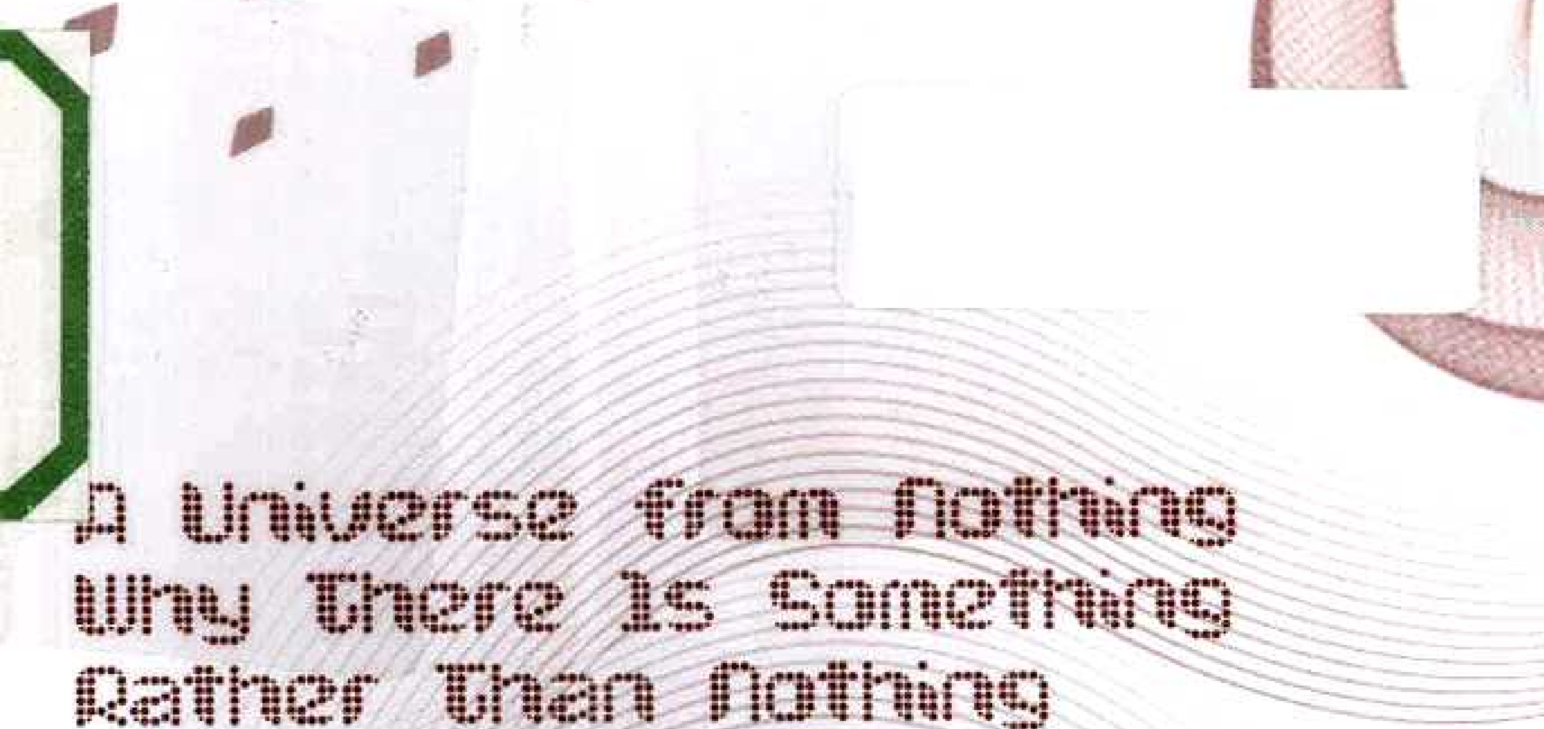
一本让你的头脑如早期宇宙一样急速膨胀的书，
讲述大爆炸之前宇宙空无之境的种种不可思议！

无中生有的宇宙

万物起源于空，空又从何而来？

当哲学家和神学家陷入一片混乱，
科学提供了真正的答案：万物与空无而非上帝有关！
由此，我们终于得知了宇宙本性和我们在宇宙中定位的最新观念。

[美] 劳伦斯·M.克劳斯◎著 刘仲敬◎译



A Universe from Nothing
Why There Is Something
Rather Than Nothing

江苏人民出版社

凤凰出版传媒股份有限公司 PHOENIX PUBLISHING & MEDIA, INC. 凤凰联动 FONGHONG BOOKS 尚书文化传媒 荣誉出品 团购：+86-10-6495-9556 投稿：cqsswh@163.com 尚书文化 新浪微博

宇宙从何而来？太初之前是什么？
未来会怎样？最后，为什么宇宙有物而非空无？

我们常常思考一些关于宇宙和人类的问题，诸如：宇宙从何而来？它将如何终结？我们为什么会在这里？本书就是一本关于宇宙和人类的书，对于这些问题，作者提供给我们一种耳目一新的答案。

最新的前沿物理研究揭示了宇宙的起源，表明宇宙是无中生有的，其它东西也是。作者向我们展示了关于宇宙起源的最新发现：

首先，我们宇宙的总能量一直为零，这是一个不争的事实。无需设想一个从虚无中诞生的宇宙有什么不同，也无需设想为什么宇宙被调节得如此精妙。

其次，将量子力学应用到宇宙时，需要有些无中生有的东西。简单来说就是：虚无是不稳定的。在微观尺度上，量子力学意味着所有的系统都在运动。总量为零的能量永远在向外扩展，因此在虚无的空间里注定要诞生出一个宇宙，也就是我们这个宇宙。

最后，物理学家最近已经开始着手调查空间存在和物理定律的起源，以及它们如何随着时间的推移发生变化，“我们的宇宙在不远的将来将会变得完全不同”这个说法将对未来产生深远影响。作者还向我们表示，科学是一种全新的道德，《无中生有的宇宙》将带给读者一个前所未有的宇宙观和世界观。

上架建议
科普·宇宙学/自然现象


ISBN 978-7-214-08642-6
9 787214 086426 >
定价：28.00元

无中生有的宇宙

万物起源于空，空又从而来？

A Universe from Nothing

Why There Is Something Rather Than Nothing

［美］劳伦斯·M. 克劳斯◎著　刘仲敬◎译

江苏人民出版社

图书在版编目（C I P）数据

无中生有的宇宙 ：万物起源于空，空又从而来？ /（美）克劳斯（Krauss,L.）著 ；刘仲敬译 . -- 南京 ：江苏人民出版社，2012.9

ISBN 978-7-214-08642-6

Ⅰ. ①无… Ⅱ. ①克… ②刘… Ⅲ. ①宇宙－普及读物 Ⅳ. ① P159-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 182362 号

A UNIVERSE FROM NOTHING:Why There Is Something Rather than Nothing
by Lawrence M. Krauss

江苏省版权局著作权合同登记：图字 10-2012-105

书　　名	无中生有的宇宙：万物起源于空，空又从而来？
著　　者	[美] 劳伦斯·M. 克劳斯
译　　者	刘仲敬
责任编辑	刘　焱
出版发行	凤凰出版传媒集团
	凤凰出版传媒股份有限公司
	江苏人民出版社
集团地址	南京市湖南路 1 号 A 楼，邮编：210009
集团网址	http://www.ppm.cn
出版社地址	南京市湖南路 1 号 A 楼，邮编：210009
出版社网址	http://www.book-wind.com
	http://jsrmcbs.tmall.com
经　　销	凤凰出版传媒股份有限公司
印　　刷	三河市金元印装有限公司
开　　本	700 毫米 ×1000 毫米　1/16
印　　张	9.5
字　　数	77 千字
版　　次	2012 年 9 月第 1 版　2012 年 9 月第 1 次印刷
标准书号	ISBN 978-7-214-08642-6
定　　价	28.00 元

（江苏人民出版社图书凡印装错误可向本社调换）

在宇宙学领域，我们正经历着一场哥白尼式的奇妙革命。《无中生有的宇宙》（*A Universe from Nothing*）就是这次革命引人入胜且杰出的入门指南。

——伊恩·麦克尤恩（Ian McEwan），
《时间中的孩子》（*The Child in Time*）作者

劳伦斯·M. 克劳斯（Lawrence M. Krauss）在《无中生有的宇宙》中，对宇宙学现状做了一番惊人的介绍。这门学科研究万物遥远的过去和遥远的未来。事实证明，万物都与空无有关、而不是与上帝有关。此书才华横溢，理据充分。

——萨姆·哈里斯（Sam Harris），
《道德景观》（*The Moral Landscape*）作者

克劳斯深入智力领域，出神入化。他陈述了宇宙本性和我们在宇宙中定位的最新观念。这是一次惊人的阅读体验。

——马里奥·利维德（Mario Livio），
《黄金分割》（*The Golden Ratio*）作者

本书清晰明了，劳伦斯·克劳斯概括了强有力的证据：我们复杂的宇宙源于酷热、致密的状态。这促进了宇宙学家发展万物起源的惊人推测。

——马丁·瑞斯（Martin Rees），
《我们的末日》（*Our Final Hour*）作者

劳伦斯·克劳斯以其特有的机智、雄辩、清晰，出色地表达了科学如何解决最重要的问题：宇宙如何无中生有？在这个问题上，哲学家和神学家陷入一片混乱。但科学能提供真正的答案，劳伦斯·克劳斯清晰的解释就证明了这一点。这是物理学对形而上学的胜利。

理性和研究征服了模糊和神话，让人人都能看清楚。克劳斯的书既有乐趣，又有教益。

——A.C. 格雷林（A.C.Grayling），

《好书》（*The Good Book*）作者

无不是虚无，无中自有物。宇宙正是这样，出自虚空。《无中生有的宇宙》思想深刻，足以给其他人提供启示。其间，这只是物理学家劳伦斯·克劳斯的另一项工作。

——尼尔·德格拉斯·泰森（Neil deGrasse Tyson），

《空间编年史》（*Space Chronicles*）作者

人们总是说，无中不能生有。谢天谢地，劳伦斯·克劳斯没有听这话。其实，这部关于宇宙空无的书在你意识到以前就对你产生了很大影响。你的思想会像早期宇宙一样迅速膨胀。

——萨姆·基恩（Sam Kean），

《消失的汤勺》（*The Disappearing Spoon*）作者

劳伦斯·M. 克劳斯的其他作品：

《物理学的恐惧》

（*Fear of Physics*）

《“星际迷航”物理学》

（*The Physics of Star Trek*）

《超越“星际迷航”：从异形入侵到时间尽头》

（*Beyond Star Trek: From Alien Invasions to the End of Time*）

《纯粹原型：失踪物质之谜》

（*Quintessence: The Mystery of the Missing Mass*）

《氧原子奇遇记：从大爆炸到地球生命……无穷无尽》

（*Atom: A Single Oxygen Atom's Journey from the Big Bang to Life on Earth...and Beyond*）

《藏身镜后：探索另类实在，从柏拉图到弦论》

（*Hiding in the Mirror: The Quest for Alternate Realities, from Plato to String Theory*）

《量子人：理查德·费曼的科学生涯》

（*Quantum Man: Richard Feynman's Life in Science*）

献给

托马斯（Thomas）、帕蒂（Patty）、

南希（Nancy）和罗宾（Robin），

是他们激发了这本书的诞生，从无中生有……

1897年的此间，

万般皆未发生。

——引自木溪酒栈（Woody Creek Tavern）墙上的牌匾

目 录

前　言

“无论美梦还是噩梦，
我们都要清醒地体验。
在我们生活的世界上，科学无孔不入。
科学完整而又真实。
我们不能无视科学，犹如对待游戏。”

——雅各布·布朗诺夫斯基（Jacob Bronowski）

为了开诚布公起见，必须承认，我并不同情世界上所有宗教的基础：有创世就必定有造物主的信念。每天都有美的奇迹出现：从寒冬清晨的雪花，到午后夏雨的彩虹。不过，哪怕是最热忱的基要主义者（fundamentalists），也不至于坚持这些美丽而精致的物体，都是神圣智慧刻意设计的最重要成果。事实上，许多外行人和科学家热衷于卖弄他们的学问：简单、精妙的物理定律如何自发生成雪花和彩虹。

当然，有人会问——许多人确实问了：“物理定律从何而来？”还有更具暗示性的：“这些定律是谁创造的？”即使有人能回答第一个问题，人家还会接着问：“可那又是从哪儿来的？”“那又是谁创造的？”诸如此类。

最后，许多有思想的人显然不得不乞灵于第一因（First Cause）。柏拉图（Plato）、托马斯·阿奎纳（Thomas Aquinas）、现代罗马天主教会都是这样，由此设想创造万物的造物主，包罗万象、无所不在。

然而，诉诸第一因仍然留下了问题："造物主是谁创造的？"尤其是：永恒存在的造物主和永恒存在的宇宙有什么区别，为什么非要支持前者？

这些论证总是让我想起一位专家（有时说是贝特兰·罗素［Bertrand Russell］，有时说是威廉·詹姆斯［William James］)举办的宇宙起源讲座，有个女人反对说：世界建立在巨龟上，巨龟下面是另一只乌龟，然后以此类推……"乌龟一只接一只！"无限回归的创造性力量自己产生自己，即使想象的创造性力量比乌龟更强大，也不能让我们更接近宇宙起源。不过，无限回归的隐喻其实比独一无二造物主的解释更接近于宇宙起源的真实过程。

以上帝终止论证，似乎可以避免无限回归，但我在这里要引用我的老生常谈：无论我们喜不喜欢，宇宙就是那样。有没有造物主，不取决于我们的愿望。没有上帝或意图的世界似乎严酷而无意义，但仅此不足以证明上帝确实存在。

与此相似，我们的心灵不容易理解无限（虽然数学是我们心灵的产物，在涉及无限的问题上很不错），但不能告诉我们无限是否存在。我们的宇宙可能在空间或时间上无限。或者像理查德·费曼（Richard Feynman）有一次提出的假设：物理法则犹如洋葱头，有无限多层次，我们探索新天地，就会发现新法则。干脆说吧，我们就是不知道！

2000多年来，宇宙问题的挑战是："为什么有物存在，而不是一切皆空？"宇宙是群星、星系、人类和天晓得还有什么的复合体。这个命题的意义是：宇宙的产生可能没有设计、意图或目的。哲学或宗教问题通常以此为框架，不过自然界最基本和最重要的问题也在于此。因此，从根本上讲，尝试和解决这些问题最合适的地方仍然是科学。

本书的目的很简单。我想显示：现代科学如何以各种伪装的形式，能够而且正在提出问题："为什么有物存在，而不是一切皆

空？”我们科学家从出色的摸索性实验观察和现代物理学基础理论得出结论，所有这些结论都提示：无中生有不是问题。其实，宇宙形成**必须**有某些无中生有的事物。一切迹象都显示：我们的宇宙**可能**就是这样产生的。

我强调**可能**这个词，因为我们没有一举廓清问题的经验性材料。但宇宙无中生有的事实依据至少对我相当有说服力。

我应该首先解释“空”（Nothing）的意义，然后才能继续。我下面还会详加讨论这个问题。我在公共论坛上发现，反对我的哲学家和神学家有一道杀手锏：科学家没有真正理解“空”的意义。（我忍不住想回敬：神学家哪方面都不精通。）

他们坚持说：“空”不是我讨论的那种意义。“空”是“非存在”（non-being），意义模糊不清。这让我想到一开始跟特创论者争辩“智慧设计论”（intelligent design）的场面，显然他们对“智慧设计论”没有清晰的概念，只知道它不是什么。“智慧设计论”只是一个无所不包的反进化论遁词。哲学家和神学家一再反复修改“空”的定义，不让它符合当前科学家采用的任何版本。

不过，照我的意见：许多神学和某些现代哲学在智力上已经破产，因为“空”和“物”（something）的物理学意义一样清楚，特别是“空”可以定义为“无物”（absence of something）。由此，我们有必要精确理解这些概念的物理学性质。没有科学，任何定义不外乎空文。

100年前，“无”（nothing）指纯粹的真空、没有真正的物质实体，这大概没有多少争议。不过，我们在过去100年内已经弄清楚：以前我们对大自然的运作了解有限，原先设想的真空远不是一片虚无。现在，宗教批评家告诉我：我不应该把真空看成无物，而应该看成“量子真空”（quantum vacuum），有别于哲学家或神学家理想化的“无”。

就是这样。不过，如果我们接下来将“空”解释为时空本身不

存在呢？这样能成立吗？我又一次……有所怀疑。但我就要提到：时空可能自发生成。因此，我们现在获悉：甚至“空”也不是真正一无所有。他们说：必须有上帝，才能避免虚空。

跟我辩论这个问题的许多人都暗示：如果“潜在状态”（potential）能有所创造，就不是真正的虚空。潜在状态肯定有某种自然法则，有别于真正的虚空。那时，如果我争辩，说自然法则像宇宙一样本身可能也是自发生成的，并不能充分解决问题，因为产生自然法则的整个系统并不是真正的虚空。

乌龟一只接一只？我不相信。但乌龟理论有其吸引力，因为科学不断改变场地，其方式令人不适。当然，这就是科学（前苏格拉底[Socrates]时代可能称为自然哲学）的目的之一。不适感意味着我们已经处在新观念形成的前夜。无疑，援引“上帝”以逃避“怎样发生”的问题，无非是智力上的懒惰。尤其是：如果没有创世的潜在状态，上帝就不可能创世。宣称上帝外在于自然、可以避免潜在的无限递归，不过是语义上的欺骗。因此，无中生有的虚空并不包括潜在状态。

在这里，我真正的目的是要说明：科学其实已经改变了场地。由此，关于虚空本质的抽象和无益的争论已经消退，描述宇宙实际起源的有益、可行的努力取而代之。我还要解释它对我们现在和未来产生的可能意义。

这反映了一个非常重要的事实。理解宇宙的演化，最好不要牵扯宗教和神学。宗教和神学经常把水搅浑，例如虚空的问题就是这样，没有任何基于经验的证据。我们还没有充分理解宇宙的起源，这时没有理由指望这方面发生变化。而且，在人类理解力的领域内，我希望宗教像道德一样，恪守本分、不要逾界。

科学能让我们更有效地理解自然，因为科学精神基于三项关键准则：1. 追随证据指示的方向。2. 若有理论，必须竭力证明其错误，犹如竭力证明其正确。3. 以实验为判断真实性的最终仲裁，不是从

原先的信仰衍生，也不是根据理论模型的美丽与典雅。

我这里所说的实验结果不仅及时，而且意外。宇宙演化的科学挂毯远比出自人类之手的故事或画像更丰富、更迷人。大自然比人类的想象力更能出奇制胜。

过去 20 年来，宇宙学有惊人的进展。粒子和重力理论彻底改变了我们的宇宙观，惊人而深刻地重塑了我们对宇宙起源和宇宙未来的理解。因此，撰写宇宙演化的书籍实在趣味无穷，只要读者受得了我的俏皮话就行。

我撰写本书，一方面想要驱散神话、攻击信仰，另一方面想要赞美知识、展示我们的宇宙多么惊人而又迷人。

我们的探索迅若旋风，直达膨胀宇宙的最远方，从最初的大爆炸直到最遥远的未来，涵盖了过去 100 年来最惊人的物理学进展。

确实，我撰写本书的直接动机是宇宙研究最近 30 年的重大成果。研究产生了惊人的结论：大部分宇宙能量弥漫于整个空间，以现在无法解释的神秘形式存在。称这个发现改变了现代宇宙学的场域，仍然过于保守。

首先，这个新发现有力地支持了宇宙无中生有的准确性。我们还因此重新审视许多宇宙演化假说，最终质疑自然法则是否真有基础性。现在，这些发现各以其方式应对宇宙无中生有的问题，我希望：如果还没有完全解决问题，至少已经使问题不那么严峻。

本书直接源于 2008 年 10 月。当时，我在洛杉矶（Los Angeles）做同名讲座。我惊讶地发现：理查德・道金斯基金（Richard Dawkins Foundation）应用了 YouTube 视频，此后多达 85 万观众看了视频。无神论和神学团体的论战多次复制引用。

既然这个题目显然引起了广泛的兴趣，网上评论和媒体追踪报道又颇多混淆，我觉得有必要在本书中更完整地表述我的理念。我还抓住现在的机会做了增补，集中补充了最近的宇宙学革命：我们

宇宙图景的彻底改变；空间能量和几何构造的发现。我在本书前三分之二讨论这些问题。

在此期间，我多加考虑自己论据的许多前身和观念。我跟其他有兴趣的人讨论，这种兴趣有传染性。我深入探讨粒子物理学发展的冲击，特别是我们宇宙的起源和性质。最后，我向激烈反对的人表达了我的论点，这样可以获得某些深刻的见解，有助于进一步发展我的论证。

我最终得以充实本书，格外受益于一些最有思想的物理学同侪。我特别想感谢艾伦·古斯（Alan Guth）和弗兰克·维尔泽克（Frank Wilczek），承蒙他们拨冗，跟我延伸讨论和通信，解决了我头脑里的疑惑，有时加强了我的解释。

在自由出版社（Free Press,）的莱斯利·梅瑞迪斯（Leslie Meredith）和多米尼克·安方索（Dominick Anfuso）鼓励下，其所属的西蒙和舒斯特（Simon and Schuster）出版集团有意出版这方面的书籍。我随即跟朋友克里斯托弗·希金斯（Christopher Hitchens）联系，他的学养、才识为我平生所仅见。他的科学与宗教论战系列作品曾经引用过我的讲座内容。我想：由他撰写前言，再合适不过。克里斯托弗虽然身体欠佳，还是和蔼、慷慨、勇敢地做到了。我永远感谢这种友谊和信任的举动。然后，在一度财务紧张的情况下，我杰出而雄辩的朋友、著名科学家和作家理查德·道金斯同意撰写前言，难关得以度过。我感谢克里斯托弗、理查德和以上各位的支持和鼓励，再次回到电脑前写作。

第一章　宇宙之谜的故事——起源

任何一趟旅程的首要谜题是：旅行者该如何到达出发点？

——露易斯·博根（Louse Bogan），

《在自己房间里的旅行》

（*Journey around my Room*）

在一个黑暗的暴风雨之夜。

1916年初，阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein）刚刚完成他的伟大工作。他经过10年艰苦的智力工作，归纳出新重力理论，他称之为广义相对论。不过，广义相对论不仅是新重力理论，而且是新时空理论。这一科学理论不仅能解释物体如何在宇宙中运动，还能解释宇宙自身的演化。这还是第一次。

但其中有一个障碍。爱因斯坦开始运用这种理论描绘宇宙整体时，发现我们显然生活于其中的宇宙无法描绘。

现在，时间大约过了100年。只在一个人生命的幅度内，很难充分理解我们的宇宙变化有多大。1917年前后的科学界认为：宇宙平坦而永恒，只有一个星系——我们的银河系。银河系之外围绕着广阔、无限、黑暗、空旷的太空。毕竟，你用肉眼或小望远镜观察太空时，没有理由怀疑还有其他事物存在。

爱因斯坦理论和以前的牛顿万有引力理论一样，认为重力是所有物体之间纯粹的吸引力。这意味着空间中的大质量物质不可能永

远静止。相互吸引终将导致内崩溃，显然有异于貌似静态的宇宙。

爱因斯坦的广义相对论不符合当时的宇宙图景，他因此受到的打击比人们想象的更大。我有理由摈弃一个广为流传的爱因斯坦和广义相对论神话，这个神话一直让我不舒服。普遍认为：爱因斯坦闭门独自工作了好几年，完全依靠思想和推论，超然于现实之外，构建了这个美丽的理论（……或许就像今天的弦理论家！）不过，真实情况差之千里。

爱因斯坦总是深受实验和观察引导。他一面做许多“思想实验”，一面用10年时间辛勤工作，学习新数学、追随许多错误的理论。最后，他得出在数学上确实美丽的理论。不过，他和广义相对论的因缘中，观察是最重要的时刻。他在最终完成理论的亢奋时刻，跟德国数学家大卫•希尔伯特(David Hilbert)竞争，用他的公式演算天体运行：水星近日点（轨道最接近的一点）进动。其他方法似乎只能推导出模糊的结论。

天文学家早已注意到：水星轨道跟牛顿物理学的预言稍有偏差。水星轨道不是完美的椭圆形回归（就是说行星不会精确地返回到同一个点上。每运转一圈方向，都会有所变化，最终形成螺旋形。）偏差值小得难以置信：100年偏离43角秒（百分之一度）。

爱因斯坦用广义相对论推算轨迹，数值刚好吻合。爱因斯坦的作传人亚伯拉罕•派斯（Abraham Pais）说：“我相信，在爱因斯坦迄当时为止的科学生涯中，又或许在他一生中，这次发现是最强烈的感情体验。”他自称心脏狂跳，里面“仿佛有东西断了”。一个月后，他向朋友描绘这个理论“不可思议的美”。他的愉快显然不限于数学形式。

不过，广义相对论和观察结果的吻合并没有持续多久。（虽然爱因斯坦修改了理论，后来还是称之为“他最大的错误”，但那主要是以后的事。）现在所有人（除了美国教育委员会的某些学校）都知道宇宙不是静态的，而是在膨胀中。宇宙膨胀始于大约137亿

年前的大爆炸，以不可思议的灼热、致密状态为起点。同样重要的是：我们知道银河系只是可观察宇宙的4000亿星系之一。我们就像早期地图测绘员，刚刚开始填满更大尺度的宇宙。几乎没有人怀疑：最近几十年见证了我们宇宙图景的革命性变化。

发现宇宙不是静态、而在膨胀中，具有深厚的宗教和哲学意义，因为这就暗示我们的宇宙有一个开端。开端暗示创世，创世激起感情。从1929年发现宇宙膨胀，到大爆炸获得独立的经验证据，用了几十年时间。1951年，教皇庇护十二世（Pope Pius XII）宣称：这是创世的证明。他说：

> ……似乎今天的科学回溯诸世纪，已经成功地发现了要有光那一刻的庄严证据。这时，物质从光与辐射的虚无之海创生。基本元素分离、扰动，形成数百万星系。于是，物理（科学）具体证实了宇宙的创生，也提出了充分的依据：世界新纪元源于造物主之手。因此，创世存在。我们可以说：因此，造物主存在。因此，上帝存在！

其实全部经过更有趣。第一个提出大爆炸的人是比利时教士和物理学家乔治·勒梅特尔（George LeMaître），勒梅特尔是罕见的通才。他最初的专业是工程师，在第一次世界大战中当装配炮兵。后来，他在1920年代初攻读神学，中途转入数学。然后，他转入宇宙学领域，首先师从著名英国天体物理学家阿瑟·斯坦利·爱丁顿爵士（Sir Arthur Stanley Eddington），接着转入哈佛大学（Harvard），最后在麻省理工（MIT）获得第二个物理学学位。

1927年，勒梅特尔在获得第二个物理学学位以前，实际上已经解决了爱因斯坦广义相对论的公式。他证明这个理论预示了非静态宇宙，暗示我们所在的宇宙在不断扩张。这种见解似乎极其可怕，爱因斯坦强烈反对：“你在数学上很重要，在物理学上就糟透了。”

但是，勒梅特尔勇往直前。1930 年，他进而提出：我们的宇宙始于“无形基点”。他称之为“原始原点”，代表开端，暗示创世或“没有昨天的日子”。

因此，教皇庇护宣扬的大爆炸，一开始是一位教士提出的。人们可能会以为：教皇的认可会让勒梅特尔兴奋不已，但在他心中，这个科学理论已经跟神学后果没有关系。1931 年，他在大爆炸的论文中删除了涉及这方面的段落。

事实上，勒梅特尔在 1951 年反对教皇宣布大爆炸证明创世纪（尤其是，他意识到：如果以后他的理论证明有误，罗马天主教会宣称的创世就会引起争议）。这时他已经选入梵蒂冈教廷学院，后来担任院长。他说：“照我看来，这种理论跟任何玄学或宗教问题毫无关系。”教皇以后再也没有公开提出这个论断。

这是珍贵的一课。勒梅特尔认为：大爆炸是否真正发生，是一个科学问题而不是神学问题。而且，如果大爆炸确实发生过（现在有压倒性证据支持），一个人也可以根据宗教和玄学观点，选择不同的解释。如果你觉得有必要，可以选择把大爆炸视为造物主的证明。相反，你也可以争辩说：广义相对论的数学解释宇宙演化，可以回溯至宇宙起源，无须任何神明介入。不过，这些形而上学推测跟大爆炸自身的可靠性没有关系，我们无须考虑。当然，当我们超越了宇宙膨胀，理解了产生起源的物理法则，如我所述，科学就会进一步阐明这种推测。

无论如何，科学界相信宇宙膨胀，并不是因为勒梅特尔和庇护教皇的说词。相反，任何良好的科学都源于细致的观察。这一次的观察来自埃德温·哈勃（Edwin Hubble）。他从律师变成天文学家，一直让我对人性更有信心。

1925 年，哈勃取得重要突破。他使用威尔森 100 胡克望远镜，是当时世界上最大的望远镜。（相比之下，我们现在建造的望远镜半径大 10 倍、面积大 100 倍！）科学家依靠那时能够应用的望远镜，

判断模糊的物体不是银河系的星星。他们称之为星云，源于拉丁文词根“模糊的东西”（其实就是“云”）。他们还争论这些物体在银河系内还是银河系外。

由于当时的主流看法认为银河系就是全宇宙，大多数天文学家站在“银河系内派”一边。（这一派的领军人物是哈佛的著名天文学家哈罗·夏普利 [Harvard. Shapley]。夏普利五年级时退学，自学成才，最后去了普林斯顿大学 [Princeton]。他决定研究天文学，因为察看课程表时，第一眼就看到天文学。他的开创性著作证明：银河系比过去的估计更大。他还证明：太阳不在银河系中心，而在不起眼的边缘。他是天文学巨擘，因此，他对星云性质的看法影响甚大。）

1925 年元旦，哈勃发表了关于所谓漩涡星云的两年研究结果。他确定了这些星云（包括现在的仙女座星云）中存在某种类型的食变光星，称为造父变星。

1784 年，造父变星第一次发现，其光度周期性变化。1908 年，哈佛大学天文台雇佣当时未被承认和赏识的候补天文学家亨利埃特·斯温·莱维特（Henrietta Swan Leavitt）作“计算机”（根据观察照片、制作恒星亮度表的女人，当时女性不能接触天文台望远镜）。莱维特是清教徒的后裔、公理会牧师的女儿。她做出一个惊人的发现，1912 年又获得进一步的启示。她注意到：食变光星的亮度和变化周期有恒定的联系。因此，如果我们能确定已知周期的造父变星距离（后来在 1913 年确定），然后再测定其他造父变星的亮度，就可以确定其他星星的距离！

因为星星的观测亮度跟距离的平方成反比（光线均匀延伸，随着距离的平方而增加。因此，光线延伸到更大区间，在任何一点上，观测亮度下降跟区域面积成反比。）判断远方星星的距离，一直是天文学的主要挑战。亨利埃特的发现是该领域的革命。（哈勃自己问鼎诺贝尔奖失意，经常说莱维特的工作配得上这个奖。不过他也

是自私自利，因为他可以作为自然竞争者，以后期工作跟她分享诺贝尔奖。）1924 年，瑞典科学院提名莱维特为诺贝尔奖候选人，文件工作实际上已经开始了。这时，他们获悉莱维特已经在 3 年前死于癌症。哈勃凭藉他个性的力量、自我推销的技巧、观察者的技能，变成了家喻户晓的角色。而莱维特，哎，只有如痴如醉的天文学爱好者才知道。

哈勃能够运用他的造父变星测定和莱维特的光度周期关系，证明仙女座和其他几座星云的变星距离太遥远，不可能在银河系内。事实证明，仙女座是另一个宇宙岛、跟银河系一样的漩涡星云、我们目前所知的宇宙 4000 亿其他星云的一员。哈勃的结论一清二楚，天文学界（其中包括夏普利，当时正好是哈佛大学天文台长。莱维特就在那里完成了她的开创性工作。）很快就接受了事实：我们周围不仅有银河系。突然间，已知宇宙的尺度急剧扩大，大大超过了过去多少个世纪！宇宙的性质和其他一切都改变了。

在这个戏剧性的发现后，哈勃本来可以躺在桂冠上休息，但他的追求不仅仅是星系。他测量更遥远星系中更微弱的造父变星，就能绘制更大尺度的宇宙地图。不过，他在测量中发现了甚至更重要的东西：宇宙在膨胀！

哈勃和另一位美国天文学家维斯特·斯里弗（Vesto Slipher）比较他测定的不同尺度诸星系距离。斯里弗曾经测定过这些星系的光谱。为了理解这些光谱的存在和性质，我必须引导读者，回到现代天文学的开端。

宇宙一大重要发现是：组成星星和地球的物质大部分相同。这个发现始于伊萨克·牛顿爵士（Sir Isaac Newton），现代科学的许多发现都是这样。1665 年，牛顿还是一位年轻科学家。他关上百叶窗，只留一个小孔，让一束阳光透过棱镜，散射成彩虹状。他推断：太阳的白光包括了所有的颜色。情况确实是这样。

150 年后，另一位科学家更仔细地检查散射光、发现光谱当中有黑带。他推断：太阳外层大气物质吸收了特定波长的颜色或光波。这些“吸收谱线”可以确定：哪些已知地球物质吸收了相应波长的光波，包括氢、氧、铁、钠、钙。

1868 年，另一位科学家观测到：太阳光谱黄色部分有两条新的吸收谱线，不符合任何一种已知地球物质的谱线。他断定：这一定是某种未知的新元素，将它命名为氦。一代人以后，地球上发现了氦元素。

观测其他星球的辐射光谱，是一种重要的科学工具，有助于了解它们的组成、温度和进化。维斯特从 1912 年开始观测各种漩涡状星云的光谱，发现这些光谱与附近的恒星相似，但所有吸收谱线的波长都有同样幅度的变化。

后来，这些现象通过熟悉的“多普勒效应”得以理解。克里斯蒂安·多普勒（Christian Doppler）是奥地利物理学家，于 1842 年提出解释：如果光源远离观察者，射向观察者的光波就会变长；如果光源逼近观察者，射向观察者的光波就会缩短。这种现象有一个人人熟知的例证：在西德尼·哈里斯（Sidney Harris）的卡通片里，两个牛仔策马奔驰在大平原上。一个牛仔看到远方的火车，对同伴说：“我喜欢听火车的悲鸣，频率随多普勒效应变化！”确实，迎面而来的火车汽笛或救护车警报声音更高、离去的声音更低。

事实证明：光波和声波同样有多普勒效应，但原因多少有些不同。光源远离观察者，光波变长变红，因为红光是最长的可见光。光源逼近观察者，光波就会变短变蓝。

斯莱夫（Slipher）于 1912 年观测到：几乎所有漩涡状星云的吸收谱线都会系统地变长（但有些星云的谱线会变短，例如仙女座星云）。因此，他准确地推论：大部分星体以相当可观的速度离我们而去。

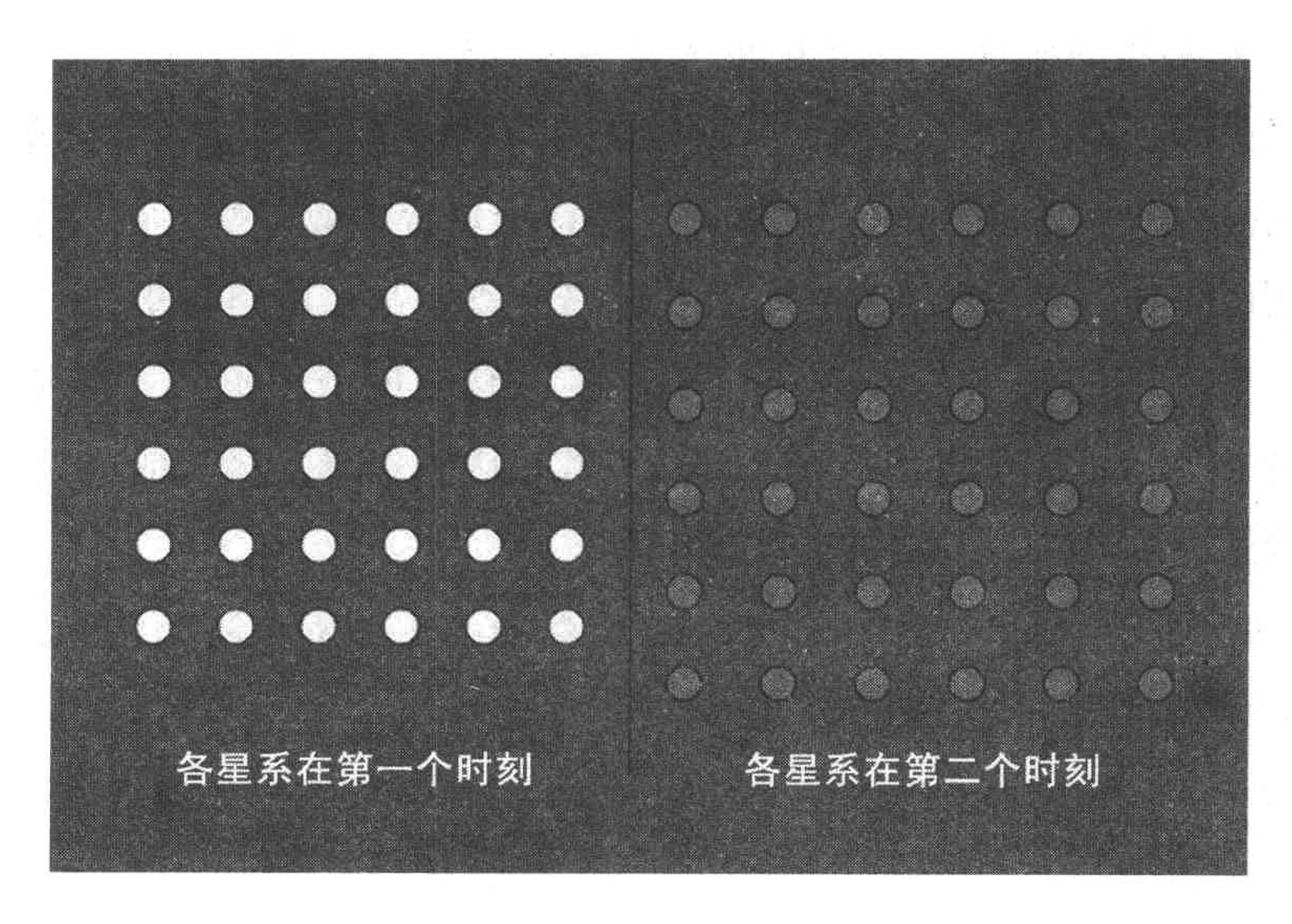
哈勃可以对比自己的漩涡状星云（现在以此闻名）距离观测值

和斯莱夫观测的远离速度。1929 年，他获得威尔逊峰观测组员米尔顿·赫马森（Milton Humason）（此人才干出众，甚至没有高校文凭就能在威尔逊峰观测组任职）的协助，宣称发现了重要的经验关系，现在称为哈勃定理：退行速度和星系距离之间存在线性关系。换句话说：星系离我们越远，退行速度就越快！

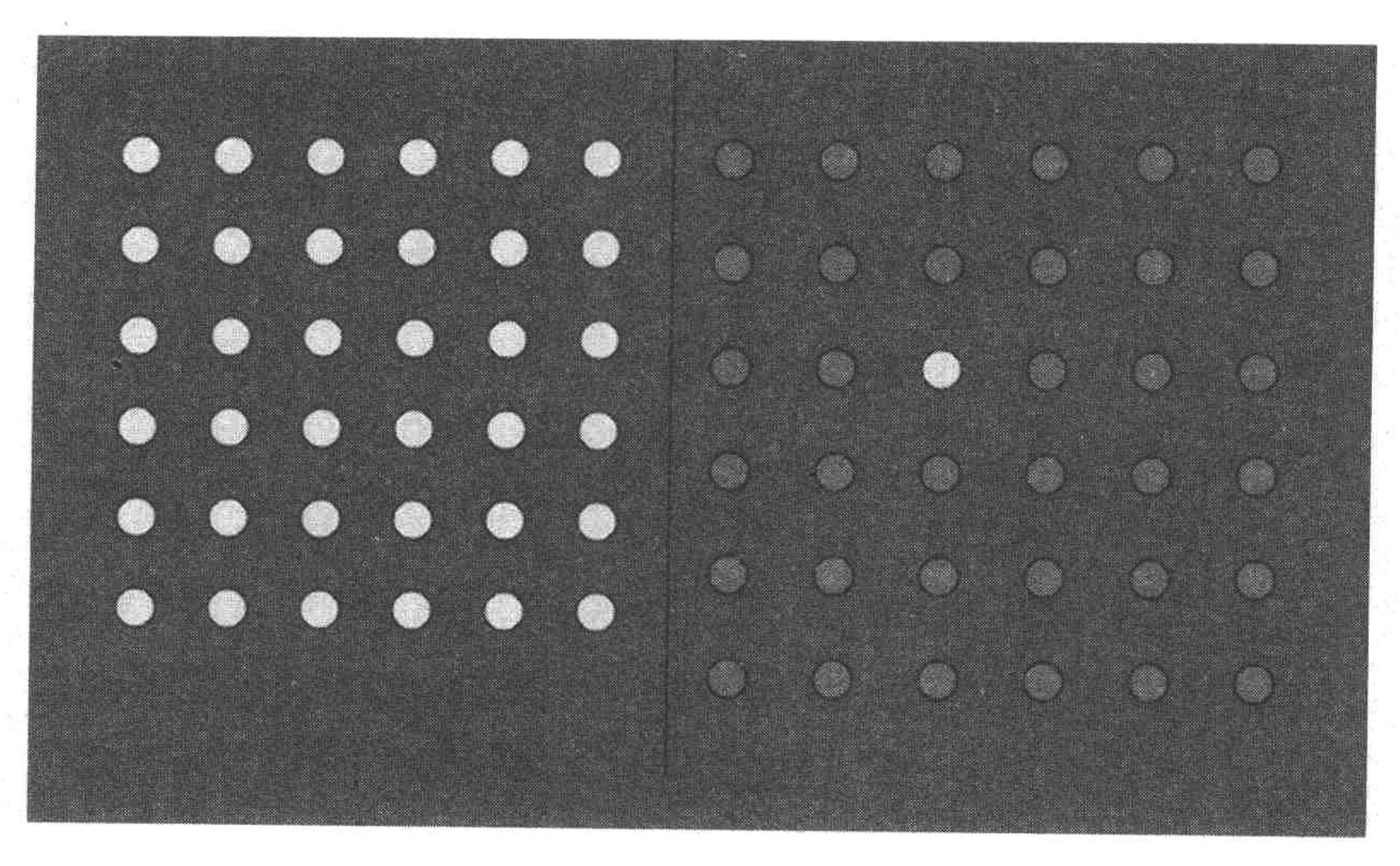
惊人的事实开始呈现：几乎所有星系都在离我们远去。距离倍增，退行速度就倍增；距离增加 3 倍，退行速度就增加 3 倍。以此类推。这显然在提示：我们就是宇宙的中心！

正如某些朋友的建议，我有必要时刻提醒自己：情况并非如此。毋宁说：勒梅特尔料事如神。我们的宇宙确实在不断膨胀。

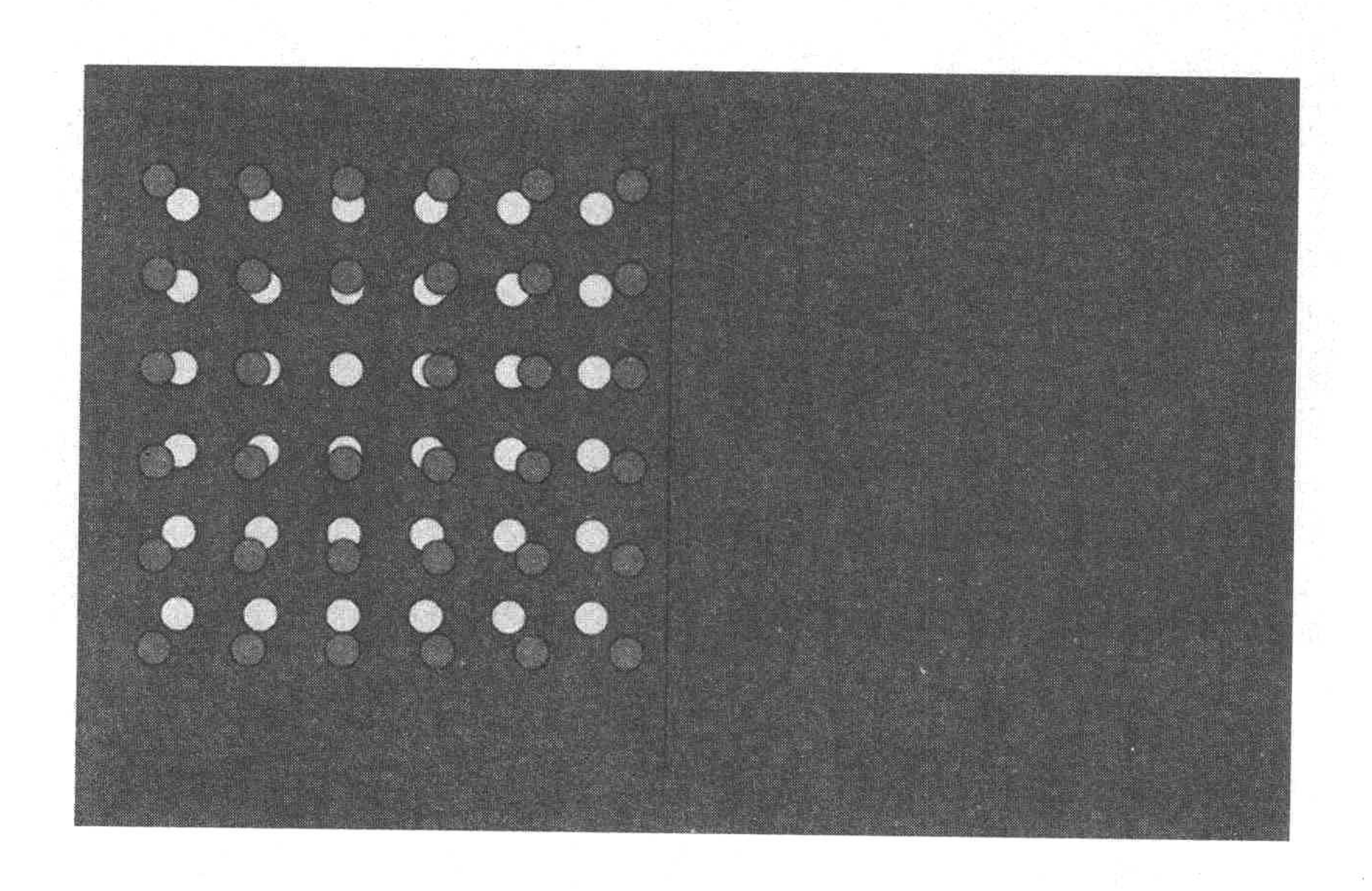
我尝试过各种解释方式。坦率地说：如果读者跳不出通常的思维框架，不能采取外在于宇宙的视角，就不容易理解这种情况。你要理解哈勃定理，就不能目光短浅，只见本星系，必须从宇宙之外观察宇宙。从二维宇宙之外观察很容易，从三维宇宙之外观察很难。我在下面的图中画出了膨胀宇宙的两个不同时刻。如你所见，各星系在第二个时刻距离更远。



现在，想象你在第二个时刻生活在一个星系上。

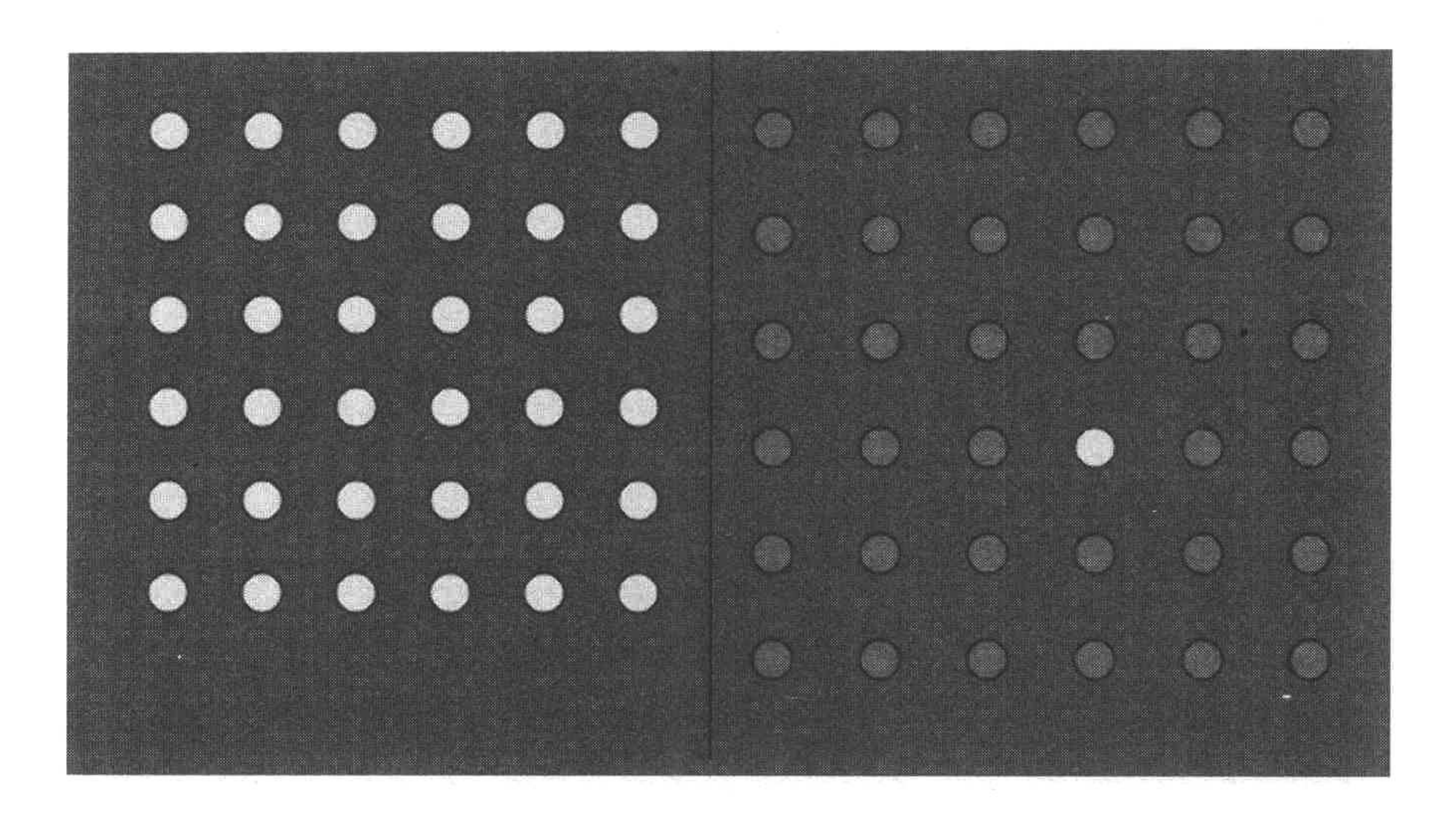


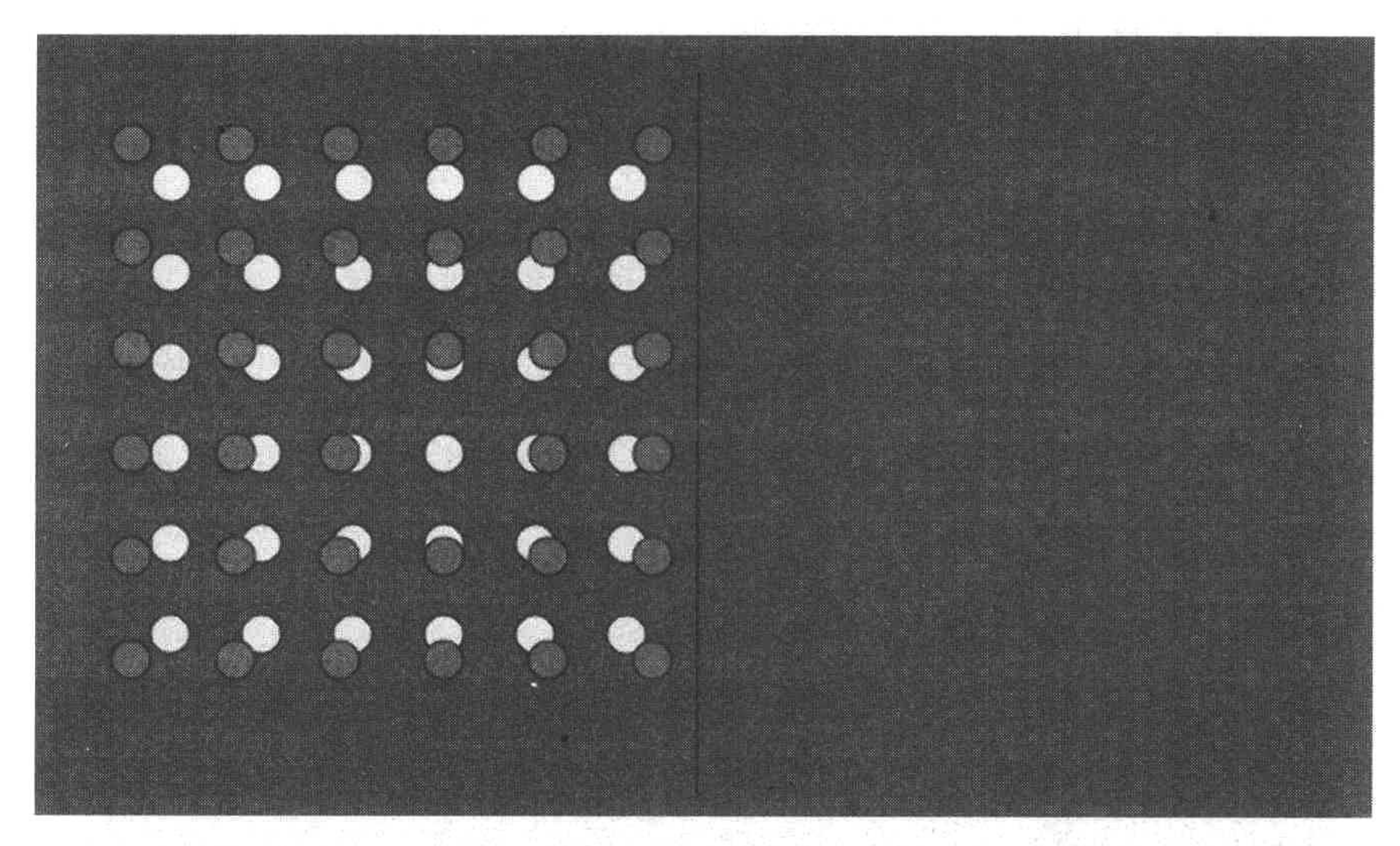
为了从这个星系的视角观测宇宙演化，我直接将右图放在左图上、将白色星系放在顶部。



瞧！从这个星系的视角看，所有星系都在离它远去。距离倍增，退行速度就倍增；距离增加 3 倍，退行速度就增加 3 倍。以此类推。既然宇宙无界，这个星系的居民就会自以为居住在宇宙的中心。

选择哪一个星系无关紧要。另选一个星系，重复上述步骤。





你的视角在哪里，哪里就是宇宙的中心。要么到处都是宇宙中心，要么哪里都不是宇宙中心。无论如何，哈勃定理符合宇宙膨胀。

1929年，哈勃和赫马森首次报道他们的分析。他们不仅报道退行速度和星系距离之间存在线性关系，还定量估算膨胀速度本身。他们在论文中提出的真实数据如下页图：

如你所见：哈勃的猜测和相关参数吻合，似乎比较合理。（仅仅依据这些参数，虽然存在某些相关性，但其是否是线性拟合尚难

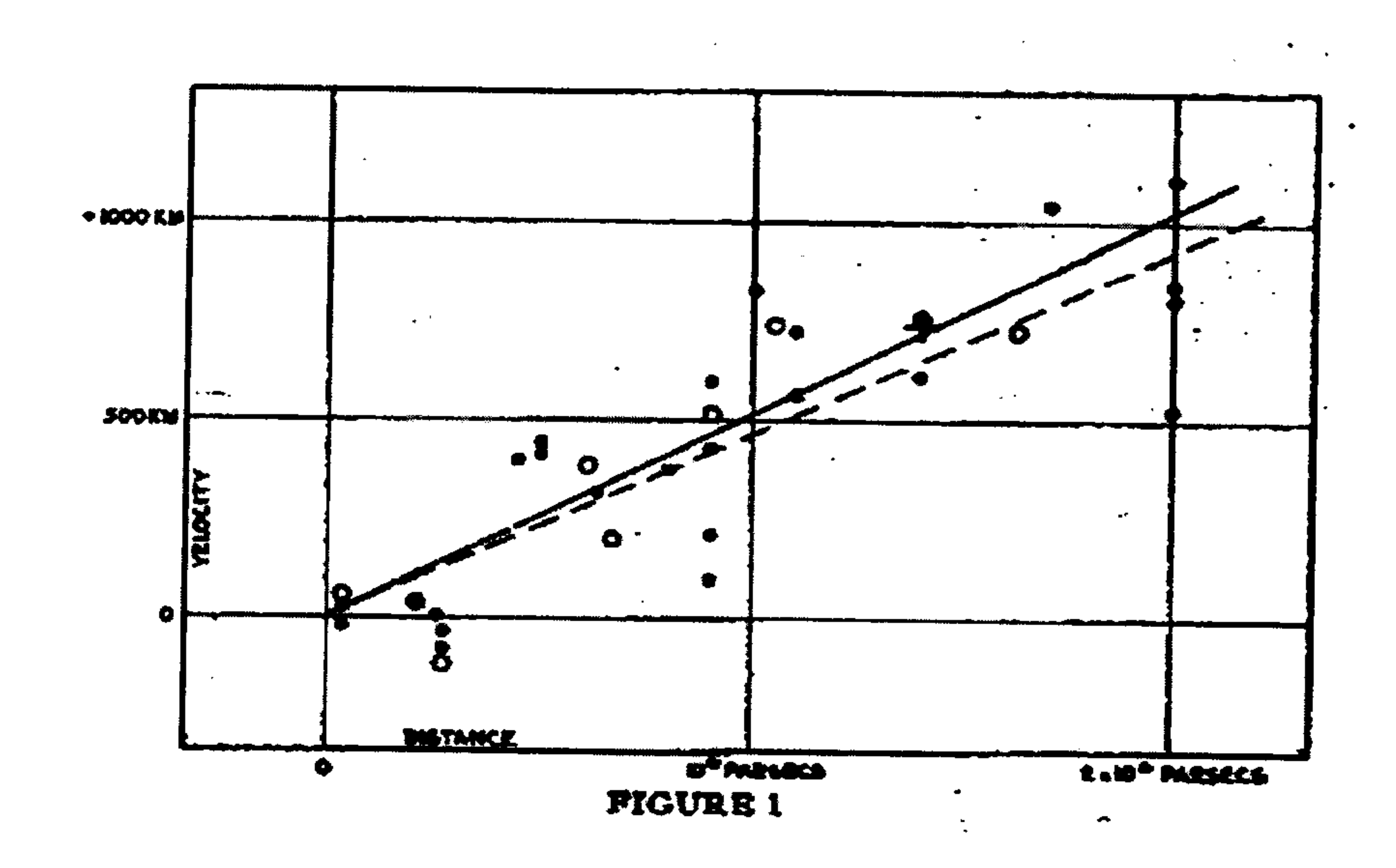


FIGURE 1

判断。）他们由此推出膨胀率，提示星系平均相距数百万光年（300万光年），退行速度每秒 500 公里。不过这个估计值并不合理。

这方面的理由似乎比较简单。如果今天万物离散，那么以前它们一定更接近。重力相互吸引，理应阻碍宇宙膨胀。这就是说：我们今天看到星系以每秒 500 公里的速度分散，而离散早已开始，以前速度更快。

不过，如果我们假定星系离散速度不变，就可以回溯过去，计算各星系什么时候处在银河系的位置上。星系距离倍增，离散速度就会倍增。因此我们回溯过去，就会发现各星系在同一时期处于我们现在的位置。事实上，我们用这种方式估计，整个可观测的宇宙就会重合在一点上，这就是大爆炸。

这个估计值显然是宇宙年龄的上限，原因在于：如果各星系以前的离散速度更快，到达现在位置需要的时间就会小于估计值。

哈勃的分析以这个估计值为基础，得出大爆炸大约发生在 15 亿年前。然而，即使在 1929 年，地球存在至少有 30 亿年，就已经证据确凿（除了在田纳西［Tennessee］、俄亥俄［Ohio］和《圣经》

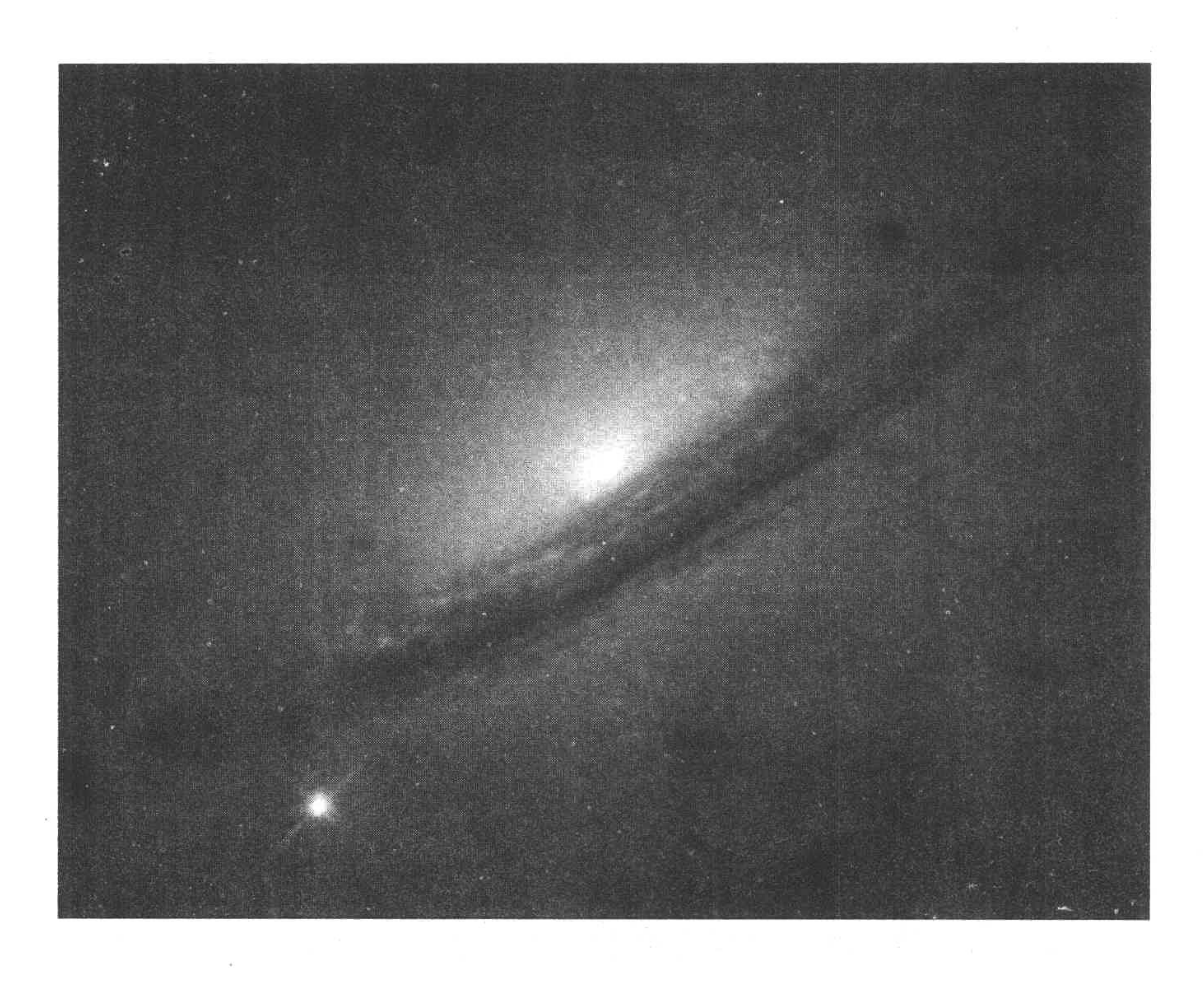
地带若干州）。

这时，科学家发现宇宙还没有地球古老，颇为尴尬。更重要的是：这提示分析有误。

混乱的原因在于：哈勃的估计假定造父变星位于我们星系内，事实并非如此。距离阶梯以附近的造父变星为依据，推算远方的造父变星，这种方法本身就有缺陷。

纠正系统性错误的历史太长、太复杂，此处无须赘述。无论如何，现在这些问题已经关系不大，因为我们有了更好的估计方法。

下面是我喜欢的一张哈勃太空望远镜图片：



图片显示：美丽的漩涡状星云从很久以前就越走越远（很久以前的原因是：各星系的光需要很长时间才能到达我们这里，超过5000万年）。这种漩涡状星云很像我们的星系，其中包含大约1000亿恒星。明亮的星系中心或许有100亿恒星。注意左下角恒星的亮

度几乎相当于这100亿恒星。读者第一眼看到它，可能会推断：这颗星离银河系更近，位于图片星系和我们之间。但事实上，这颗星位于距离相似的星系，大约,100亿光年外。

显然，这不是普通的恒星。这是一颗刚刚爆发的超新星，超新星是宇宙中最明亮的烟火之一。超新星爆发时，在短时间内（大约一个多月）亮度超过100亿恒星。

超新星爆发机会甚少，大约每个星系100年发生一次，这对我们人类堪称幸事。不过，超新星已经爆发过，对我们人类同样堪称幸事。若非如此，人类就不会存在。你身体的每一个原子都来自爆炸的超新星，据我所知，这是宇宙最有诗意的事实之一。而且，很可能你左手的原子跟右手的原子来自不同的星星。我们都是字面意义上的星童，我们的身体由星尘组成。

我们怎么知道的？哎，我们回溯大爆炸，直到宇宙刚刚诞生一秒钟的时刻。我们推断：当时只有高密度的基质，温度高达100亿度。在这样的温度条件下，质子和中子可以轻易进行核反应，在碰撞中结合而又分离。我们不难预见：随着宇宙冷却，原始核液体形成比氢、氦、锂更重的元素，机会能有多大。

我们发现：大爆炸产生的原始火球很难产生比锂更重的元素。锂在元素周期表上位列第三。我们推断宇宙富含轻元素，准确无误。名列前十位的轻元素，如氢、氘（重氢原子）、氦、锂之类独占鳌头。（大约百分之二十五的质子和中子变成氦。一百亿分之一的质子和中子变成锂。）超过这个不可思议的范围，观测值符合理论上的预测值。

这个最著名、最成功、最重要的预测值告诉我们：大爆炸确实发生过。只有灼热的大爆炸才能产生丰富的轻元素，符合目前观测到的宇宙膨胀。轻元素预测值丰度和观测值丰度的对比数据，就放在我后兜的钱包里。我每一次遇见不相信大爆炸的人，就会拿钱包里的卡片给他看。当然，我在讨论中一般无须如此。数据给人的印

象通常远不如图片。无论如何，我在本书后面会把卡片上的数据提供给读者。

锂对有些人的重要性超过碳、氮、氧、铁之类一切重元素对其他人的重要性。后面这些重元素不是在大爆炸当中产生的。只有恒星灼热的内核才能产生这些重元素。重元素进入人体的唯一途径是恒星爆炸。元素在宇宙中四散，因此有朝一日可能并入太阳附近的小型蓝色行星。在银河系的历史中，大约2亿颗恒星曾经爆炸过。这么多恒星牺牲自己，让你有朝一日得以出生。我想：它们的救世主资格不比其他人差。

典型的超新星爆炸称为Ia型，其特征值得注意，1990年代以来已经受到精确而详尽的研究。Ia型超新星天然亮度更高、爆炸时间更久。二者在经验上有非常密切的关系，但理论上还没有充分理解。这意味着这些超新星是非常适用的“标准烛光”。我们可以用这些超新星测量距离,因为直接确定天然亮度的手段不受距离影响。我们如果观测到远处星系的超新星（超新星非常亮，因此一般都能观测到），就可以通过爆炸时间确定其天然亮度。然后，我们用望远镜测量超新星的表观亮度，就能精确判断超新星及其所在星系的距离。接下来，我们测量星系中恒星的红移，就能判断其速度。由此，比较速度和距离，就能推断出宇宙膨胀的速度。

迄今为止一切顺利。但如果每个星系100年才有一次超新星爆炸，我们怎样才能看到一次？毕竟，地球最近一次见证的银河系超新星爆炸，还是约翰尼斯·开普勒（Johannes Kepler）在1604年观测到的！确实，据说银河系超新星只会在最伟大的天文学家在世时爆炸，开普勒肯定符合这个条件。

开普勒一开始是卑微的奥地利教师，为天文学家第谷·布拉赫（Tycho Brahe）——第谷观测到一次更早的银河系超新星，丹麦国王赏赐他一个小岛为报酬——当助手。开普勒用第谷的数据计算行星位置，经过十几年时间，在17世纪初总结出行星运动三大

定理：

一、行星以椭圆形轨道环绕太阳。

二、行星与太阳的连线在相同时间内扫过相同面积。

三、行星轨道周期的平方直接与行星轨道半长轴（也就是椭圆形的半长轴、太阳最短轴和最长轴的平均值）的立方成正比。

这些定理进而为100年后的牛顿万有引力定律打下了基础。开普勒除了这个卓越贡献，还在一次巫术案件中为母亲辩护成功。他还写了或许是第一部科幻小说，题材是月球旅行。

今天，观测超新星有一个办法：给每一个星系安排一个研究生。毕竟，从宇宙角度讲：100年和读博士的平均时间没有多少差别。研究生既廉价又充足。不过，我们幸好用不着这样极端的措施。原因非常简单：宇宙如此广大、如此悠久，因此，小概率事件一直都在发生！

你们晚上去能看到星星的森林或沙漠。举起手，用拇指和食指构成一个硬币大小的圆圈，让圆圈对准没有可见星星的天空。在这个区域内，今天使用的望远镜可以看到大概10万个星系，每一个星系都有数十亿星星。既然每个星系100年爆炸一次超新星，10万个星系平均每天晚上可以看到3次超新星爆炸。

天文学家就是这么做的。他们申请用镜时间，有些晚上能看到一次爆炸；有些晚上能看到两次；有些晚上多云，什么都看不见。几个小组用这种方式确定了哈勃常数，误差不超过百分之十。新数据表明：星系平均退行速度每秒钟70公里、每年300万光年，比哈勃和赫马森的数据小百分之十。由此，我们推断：宇宙年龄更接近于130亿年，而不是15亿年。

我后面还要说到：独立估计星系中最古老的恒星，结果完全相

符。从布拉赫到开普勒、从勒梅特尔到爱因斯坦和哈勃、从恒星光谱到轻元素丰度，现代科学在400年间绘制的宇宙膨胀图景彼此相符。一切吻合。大爆炸的拼图完美无缺。

第二章　宇宙之谜的故事——称量宇宙

有了解的已知。我们了解的已知。
有了解的未知。
就是说，我们了解的未知。
有不了解的未知。
——唐纳德·拉姆斯菲尔德（Donald Rumsfeld）

确定了宇宙有起源，起源位于有限、可测的过去。下一个问题自然是："宇宙怎样结束？"

事实上，我就是因为这个问题才从本专业粒子物理学转向宇宙学。在1970和1980年代，恒星运动、星系气体和星系在星系群中的运动受到详细的研究，情况越来越清楚：宇宙存在更多肉眼和望远镜看不到的东西。

大尺度星系主要受重力影响，因此，我们在星系尺度上测量这些客体的运动，就可以探测引起这种运动的吸引力。美国天文学家维拉·鲁宾（Vera Rubin）及其同事于1970年代初开创了这些探测手段。鲁宾在乔治城大学（Georgetown）夜校获得博士学位。她不会开车，丈夫在车里等她。（她报过普林斯顿大学，但后者1975年以前不接受天文学女研究生。）鲁宾是皇家天文学会金奖的第二位女性得主。她因测量银河系自转速度的开创性工作而荣获该奖和其他当之无愧的奖项。鲁宾观测这些不断远离银河系中心的星体和热气体，断定其运转速度比其他预测更快。由于她的工作，宇宙学家得以更清楚地解释这些运动。唯一合理的假设是：我们的星系还

有更多物质，质量大于所有星体和热气体。

不过，这种观念有一个问题。同样的估计非常漂亮地解释了宇宙轻元素（氢、氦、锂）观测丰度，还多多少少说明了质子和中子的数量。后者是宇宙中普通物质的原材料。就食谱而言，你烹饪的成果有赖于开始时各种原料的分量，宇宙也是这样，只不过变成核烹饪而已。如果食料分量倍增，比如煎蛋卷用 4 个蛋代替 2 个蛋，产物也会增加。大爆炸后，宇宙早期的质子和中子密度取决于氢、氦、锂丰度观测值，2 倍于可见星体和热气体的物质。这些看不见的粒子在哪里？

不难想象质子和中子隐藏在哪里（雪球、行星、宇宙学家……都不发光）。因此，许多宇宙学家预测暗物质跟明物质一样多。然而，为了解释星系客体的运动，暗物质跟明物质的比例应该是 10∶1，而不是 2∶1。如果这个估计正确，质子和中子不足以组成暗物质。它们不够多。

1980 年代初，我还是一位年轻的基本粒子物理学家。我获悉暗物质可能不同于普通原子核结构，无比兴奋。暗物质从字面上讲，就暗示宇宙主要粒子不是熟知的质子和中子，而是奇异的新型基本粒子。有些种类可能在现在的地球上不存在，却神秘地流布于群星之间，悄然补充了全星系的重力。

暗物质暗示了三条研究线索，可以从根本上重构实在的性质，至少让我更为兴奋。

1. 如果这些粒子像前述轻元素一样，产生于大爆炸，我们应该可以运用基本粒子相互作用力（而非决定元素丰度的核力）估计今天宇宙中奇异新粒子的丰度。

2. 宇宙暗物质总丰度可能从粒子物理学理论概念推出，也可能设计新实验探测暗物质。这两种方法都可以测定宇宙物质总量，由此判断我们宇宙的几何特征——平坦、

开放或封闭。物理学不能为了解释看得见的事物，发明看不见的事物；只能为了观测看不见的事物，寻找方法——观测原先看不见的事物，了解原先不理解的事物。每一种可能构成暗物质的基本粒子，都提示了直接探测暗物质粒子的新实验。暗物质粒子弥漫于全宇宙，地球穿越太空时就会遭遇这些粒子，地球上的设备可以测出。无须启用太空望远镜寻找遥远的星体，暗物质粒子弥漫于整个星系。因此我们身边肯定就有，地球上的探测器就能显示其存在。

3. 如果我们能判断暗物质的本质及其丰度，就能确定宇宙的结局。

最后一种可能性似乎最令人兴奋，因此我由此入手。其实，我涉足宇宙学就是想第一个发现宇宙的结局。

当时，这个想法似乎不错。

爱因斯坦广义相对论的核心是：空间可能因物质或能量的存在而弯曲。1919年，两支探险队发现：日蚀期间，太阳周围的光线扭曲，精确吻合爱因斯坦对太阳弯曲空间的理论预测。从此，广义相对论就不再仅仅是理论上的推测了。爱因斯坦几乎一举成名、家喻户晓。（今天，大多数人以为爱因斯坦成名的原因是15年前的$E=mc^2$公式，其实并非如此。）

既然空间可能弯曲，全宇宙的几何特性就突然变得更有趣了。所谓“开”、“关”、“平”3种不同类型的宇宙，取决于全宇宙的物质总量。

很难想象弯曲三维空间实际上的样子。我们自己就是三维生命，因此难以直观体会弯曲三维空间，类似名著《平面国》（*Flatland*）的二维生命。他们难以体会：在三维观察者眼中，他们的世界就像弯曲的球面。而且，如果曲率非常小，就难以在日常生活中发现。正如中世纪大多数人觉得大地看起来平坦，就一定是平的。

弯曲三维宇宙难以描绘，但有些特征容易表达。闭合宇宙就像三维球体，听起来很吓人。在闭合宇宙中，如果你直视某一个方向足够远，视线就会回到自己头上。

这些稀奇古怪的几何特征有趣而难忘，但其存在的后果更为重要。广义相对论明确告诉我们：闭合宇宙的能量密度取决于恒星和星系之类物质。即使暗物质增加，也一定会导致有朝一日宇宙塌缩、类似大爆炸逆转。如果你高兴，可以称之为宇宙大塌缩。开放宇宙会永远以有限速度膨胀。平坦宇宙膨胀有极限，不断减慢，但永不停止。

确定暗物质总量，由此确定宇宙总密度，古老问题（至少跟T. S. 艾略特［T. S. Eliot］一样古老）的答案有望显现。宇宙结束于爆炸，还是呜咽？确定暗物质总丰度的传奇至少可以追溯到半个世纪前。这个题材完全可以写一本书了。其实，我的《第五元素》（*Quintessence*）就是这样一本书。不过，我在此处（通过文字和图片）证明：一幅图片胜过1000字（甚至10万字）。

超星系团是宇宙中重力最大的物体，包括上千个，甚至更多星系，绵延数千万光年。大多数星系都位于某个超星系团内。其实，银河系就在处女座超星系团内，超星系团中心距我们有6000万光年之遥。

超星系团地域广大、质量巨大，因此基本上任何物质都会落入超星系团。因此，如果我们称量超星系团，而后估计宇宙中超星系团的总密度，就可以由此“称量宇宙”，包括所有暗物质。然后，我们可以运用广义相对论方程式：根据宇宙内有没有足够的物质，确定宇宙是开放还是闭合。

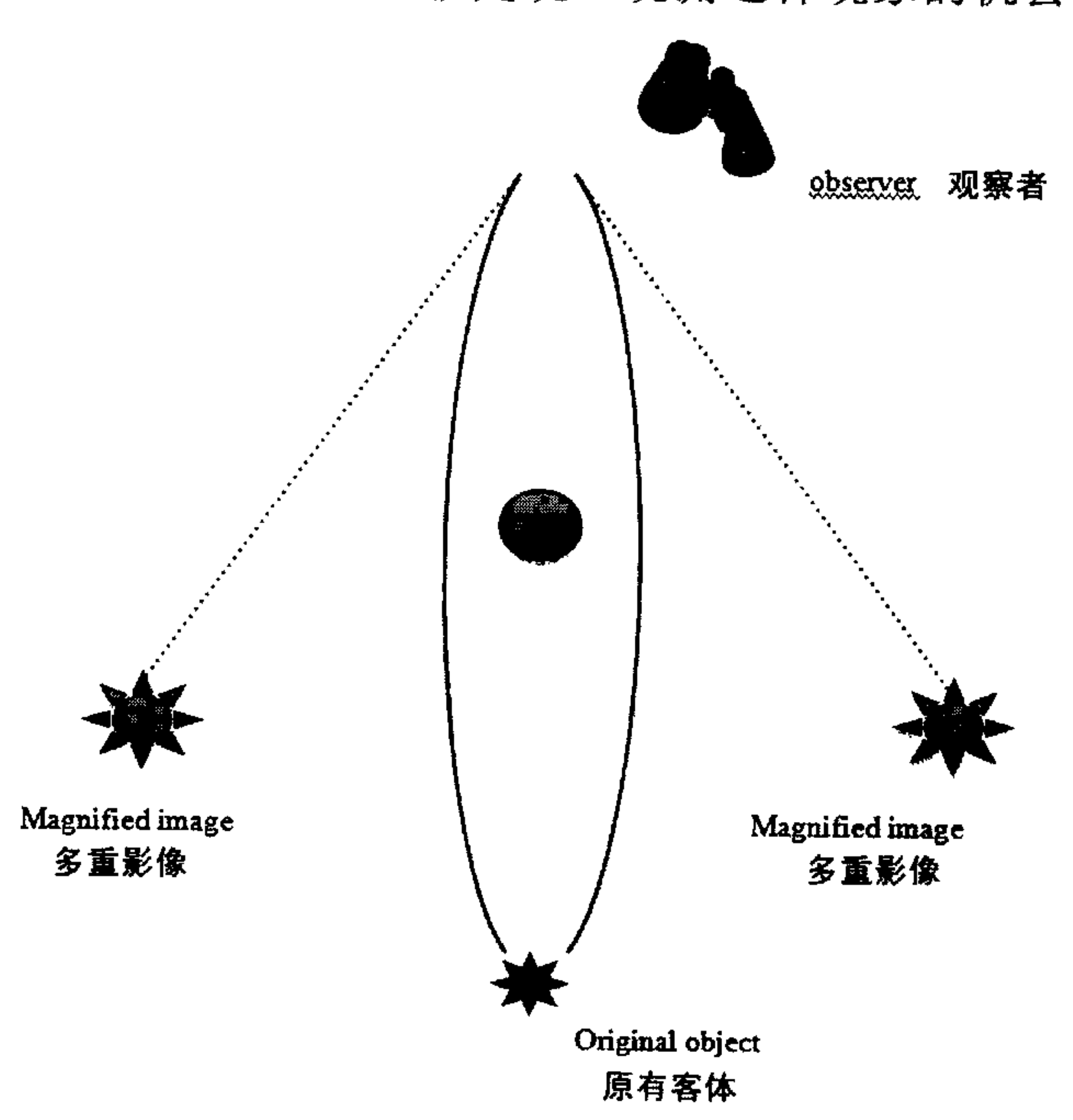
迄今为止一切顺利。但我们怎样测量数千万光年外的物体呢？很简单，利用重力！

1936年，阿尔伯特·爱因斯坦敦促业余天文学家卢迪·曼德尔（Rudi Mandl）在《科学》（*Science*）杂志上发表一篇短文《引力场偏光类透镜效应》（*Lens-Like Action of a Star by the*

Deviation of Light in the Gravitational Field）。爱因斯坦在这篇短文中证明了一个重要事实：太空有透镜作用，能偏转、放大光线，就像我们的老花镜一样。

1936 年是一个更温和、更优雅的时代。爱因斯坦论文开题不拘一格，读来饶有趣味："一段时间以前，R. W. 曼德尔来访。他邀请我发表一份小小的估算结果，那是我应他要求计算的。本文满足了他的愿望。"论文不正规或许因为作者是爱因斯坦，但我宁愿归因于时代因素。那时，科学语言并不总是跟日常语言不一致。

无论如何，广义相对论的第一个重要预测已经证实：如果空间弯曲，光线的轨迹也会弯曲。如前所述，这个发现给爱因斯坦带来了国际声誉。因此，（最近发现）爱因斯坦于 1912 年就已经做了计算，或许不足为奇。计算结果跟他 1936 年应曼德尔之邀发表的内容相同。当时，广义相对论还没有完成，他试图找到一些可观测现象，以便说服天文学家检测他的观点。或许因为他在 1912 年已经得出了 1936 年论文同样的结论，也就是说"观测这种现象的机会不大"，



他从来没有费心发表早期成果。事实上，我们检查过他这两个时期的笔记本，无法确定他后来有没有想到24年前的原创。

这两次，爱因斯坦确定了光线在重力场中弯曲。这意味着：如果发光体和观察者之间存在有质量的东西，光线就会在中介质量附近弯曲、重聚，正如光线透过普通透镜。这样要么会放大原有的客体，要么就会产生原有客体的多重影像，其中有一些可能是歪曲的（见上图）。

爱因斯坦计算中介星体对遥远星体的透镜效应，效应极其微弱，似乎无法测量。他注意到上图描绘的情况，似乎永远无法观测。因此，爱因斯坦认为：他的论文没有多少实际意义。他当时在附言里告知《科学》杂志的编辑：“我还要感谢你们发表这篇曼德尔先生挤出来的小文章。价值不大，但能让可怜人开开心。”

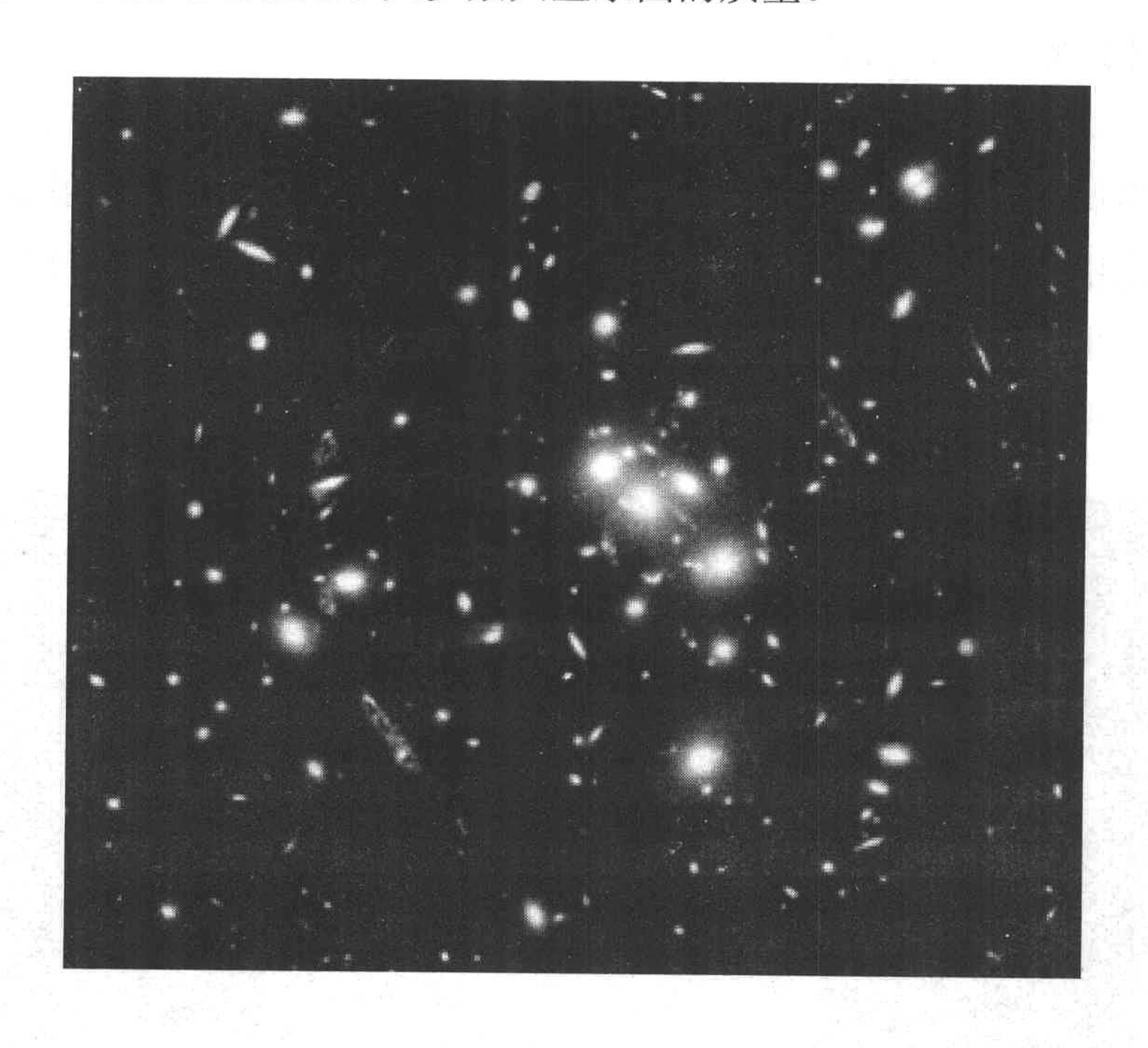
不过，爱因斯坦不是天文学家。一位天文学家会意识到：爱因斯坦预测的效应不仅可测，而且有用。不是用星体的透镜效应测量星体，而是用更大体系的透镜效应测量遥远的客体，例如星系，甚至星系团。爱因斯坦的文章才发表几个月，加州理工学院（Caltech）的杰出天文学家弗里茨·茨维基（Fritz Zwicky）就向《物理评论》（*The Physical Review*）递交了一篇论文。他精确地证明了这种可能性的实际价值（也间接贬低了爱因斯坦，因为他只想到星体的透镜效应，没有考虑星系。）

茨维基性情急躁，思想远远领先于时代。早在1933年，他就分析过后发座星系团各星系的相对运动。他运用牛顿运动定理，分析指出：星系运动速度这么快，理应早已分散，使星系团解体。唯一的解释就是：星系团的质量远远超过星体质量总和的100倍。由此，他本来可能已经发现了暗物质，但当时他的推论惊世骇俗，大多数天文学家宁愿选择不那么古怪的解释。

茨维基1937年的论文只有1页，跟他本人同样卓越。他提出：重力透镜有3种不同的用途。1. 验证广义相对论。2. 利用中介星系

为某种望远镜，观测地球望远镜看不到的遥远星体。3. 最重要的是：解释星系团重量超过可见物质的原因。“观测星云周围的光线弯曲度，可以最直接地判断星云质量，澄清上述质量差异。”

茨维基发表论文已经 74 年了，但利用引力透镜探测宇宙的想法似乎仍然非常现代。事实上，他建议的每一种用途都付诸实施，最后一种格外重要。1987 年，第一次通过中介星系观测遥远类星体的引力透镜。1988 年，茨维基提出利用引力透镜测量星云质量的 61 年后，引力透镜测定了大多数大星系团的质量。

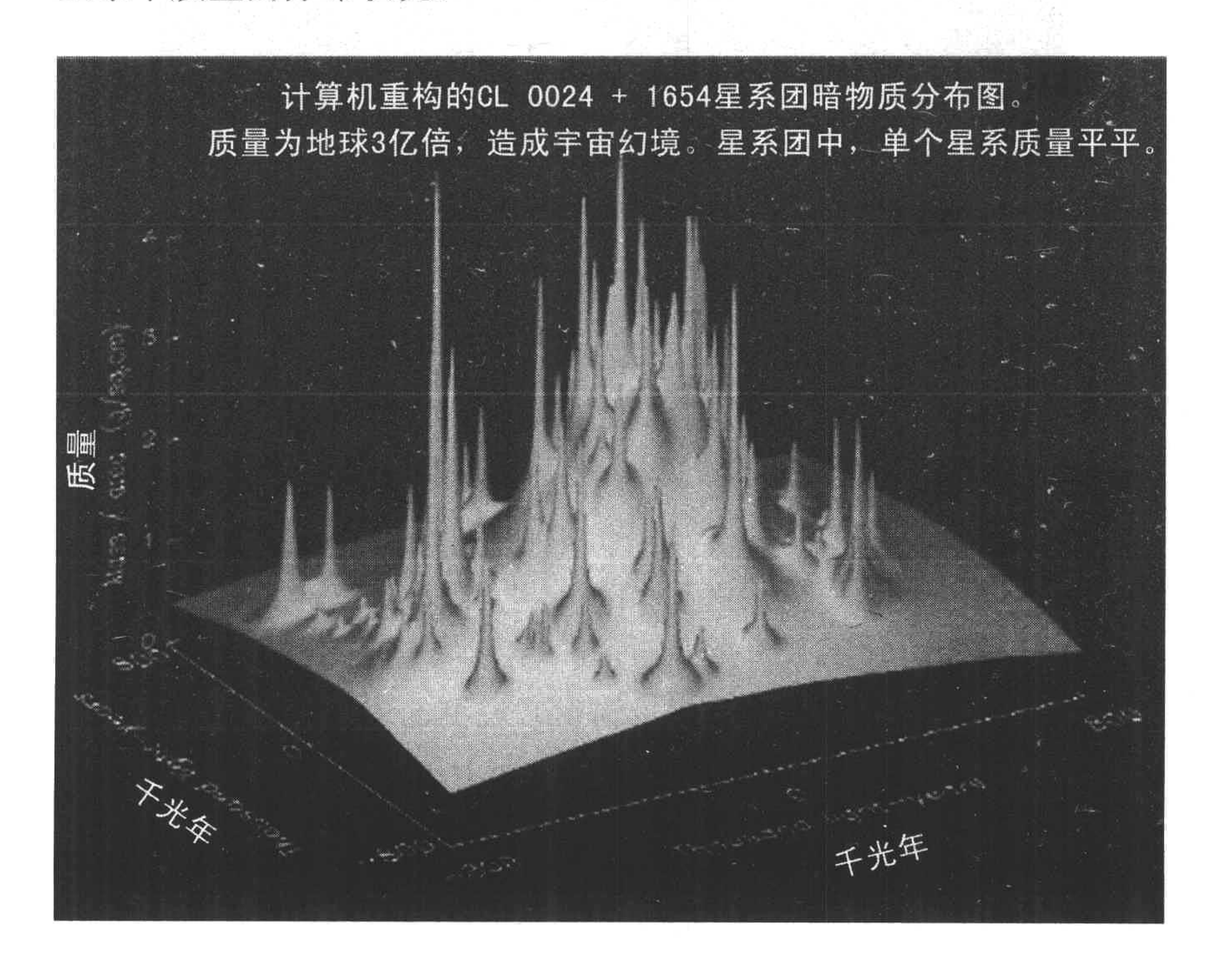


那一年，物理学家托尼•泰森（Tony Tyson）及其同事在今天已经不复存在的贝尔实验室（伟大的科学贵族和诺贝尔传统苗圃，其发明从晶体管到宇宙微波背景辐射）观测的遥远的星系团，编号 CL 0024+1654，有声有色，距离我们 50 亿光年。上面是哈勃太空望远镜拍摄的美丽图片。星系团后面再过 50 亿光年，有遥远星系壮观的多重影像，高度扭曲、拉长，周围的其他普通星系通常更接近

圆形。

这种图片为想象提供了燃料。首先，图片上每一个点都是一个星系，而不是星体。每一个星系包括1000亿星体，大概伴有1万亿行星。行星上也许有失落已久的文明。我说失落已久，因为图片是50亿年前的星系。光线来自5亿年前，那时我们的太阳和地球都还没有形成。图片上有许多星体已经在几十亿年前耗尽核能，不复存在了。不宁唯是，歪曲的形象还确切地显示：茨维基的论证有可能成立。中间靠左的图像严重扭曲，是遥远的星系放大、拉长的结果。若非如此，就无法看见。

以图像为基础，判断星系团的质量分布，这是一个复杂难解的数学挑战。泰森为此建立了计算机模型，通过星系团追溯辐射源。他运用所有不同方法，以广义相对论确定合适的方法，直至符合观测。尘埃落定时，泰森及其同事获得了立体图，精确显示原始图片星系中质量的分布状况。



图片有些奇怪的情况。曲线峰值代表可见星系在原始图形中的距离，但星系团大部分质量位于各星系之间，分布平滑而模糊。星系之间的物质超过可见星系的物质 40 多倍（超过星体及周围热气体的物质 300 多倍）。暗物质显然不限于星系，形成了星系团大部分密度。

暗物质在星系团中，像我这样的粒子物理学家并不惊讶。我们即使没有丝毫直接证据，都会希望暗物质数量足以产生平坦的宇宙。这意味着宇宙暗物质必须超过可见物质 100 倍。

原因很简单：只有平坦的宇宙具备数学美感。为什么？保持和谐。

暗物质总数是否足以产生平坦的宇宙？引力透镜观测值（不要忘记，引力透镜源于大质量物体周围的局部空间弯曲。平坦的宇宙对应球状平均空间曲率，大质量物体周围的局部空间褶皱可以忽略不计。）和其他天文学领域最近的观测值确定：暗物质总数远远超过大爆炸核反应产生物质的估计值。事实上，我们几乎可以肯定：暗物质包括一些全新的、在地球上一般不存在的物质。我重申：各种不同天体物理学环境各自独立地证实了这个结论，从星系到星系团概莫能外。这种东西既不是星体物质，又不是地球物质！但它就是存在！

银河系早期暗物质的推论产生了一个全新的实验物理学领域，我为这门学科的发展助了一臂之力，颇为自得。如前所述，暗物质粒子就在我们身边：在我们打字的房间里、在我们探索的太空里。今后，我们可以通过实验寻找暗物质粒子、寻找暗物质粒子组成的基本粒子。

实验在地底深处的矿井和隧道里进行。为什么在地底？因为地球表面不断受到各种宇宙射线的轰击，射线来自太阳或更远的天体。暗物质的本性不会产生电磁相互作用，因此不会发光。我们可以设想：暗物质和普通物质的相互作用非常微弱，因此很难探测。我们

每天受到数百万暗物质粒子的轰击，大部分粒子将会穿过我们和地球，甚至没有“体会”到我们的存在——没有引起我们的注意。你如果想探测极少数例外：暗物质粒子实际上从物质原子上反弹回来的情况，就应该准备寻找稀有罕见的事件。一般而言，这种情况只出现在屏蔽了宇宙射线的地底。

不过，本书写作时，出现了同样惊人的可能性。瑞士日内瓦（Geneva）的大型强子对撞机是全世界最大、最有力的粒子加速器，这时已经开始运作。我们有许多理由相信：高能质子在仪器中对撞，非常接近于早期宇宙的情况，只是范围极小而已。在这个范围内，实验室重复了宇宙极早期产生暗物质的相互作用！自此，竞争连续不断。谁会第一个发现暗物质？是地底深处的实验者，还是大型强子对撞机的实验者？好消息是：无论谁赢，没有人输。揭示物质的本性，我们都会赢。

即使我所说的天体物理学手段不能显示暗物质的本性，至少也可以显示暗物质的数量。这样的引力透镜与星系团 X 射线一起，最终、直接确定了宇宙物质总量。独立估计星系团总质量是可能的，因为星系团产生X射线的气体温度与发出X射线的星系总质量有关。结果令人惊讶。我顺便提一下，许多科学家大失所望。在字面意义和比喻意义上，尘埃落定。产生今天的平坦宇宙，星系和星系团及其周围物质只应该占总质量的百分之三十。（注意暗物质超过可见物质 40 倍，因此不到百分之一的质量就能决定平坦宇宙的产生。）

爱因斯坦会惊讶地发现：他的“小文章”远不是没有用处。重要的实验和观测新工具的增加，打开了宇宙的新窗口。他对理论新进展既惊讶又高兴，发现暗物质可能让他血压上升。爱因斯坦进入弯曲空间的世界，步骤越来越大。1990 年代初，宇宙学的圣杯显然已经到手。观测已经确定：我们生活在开放的宇宙。因此，宇宙永远膨胀。还能怎样呢？

第三章　来自时间起点的光

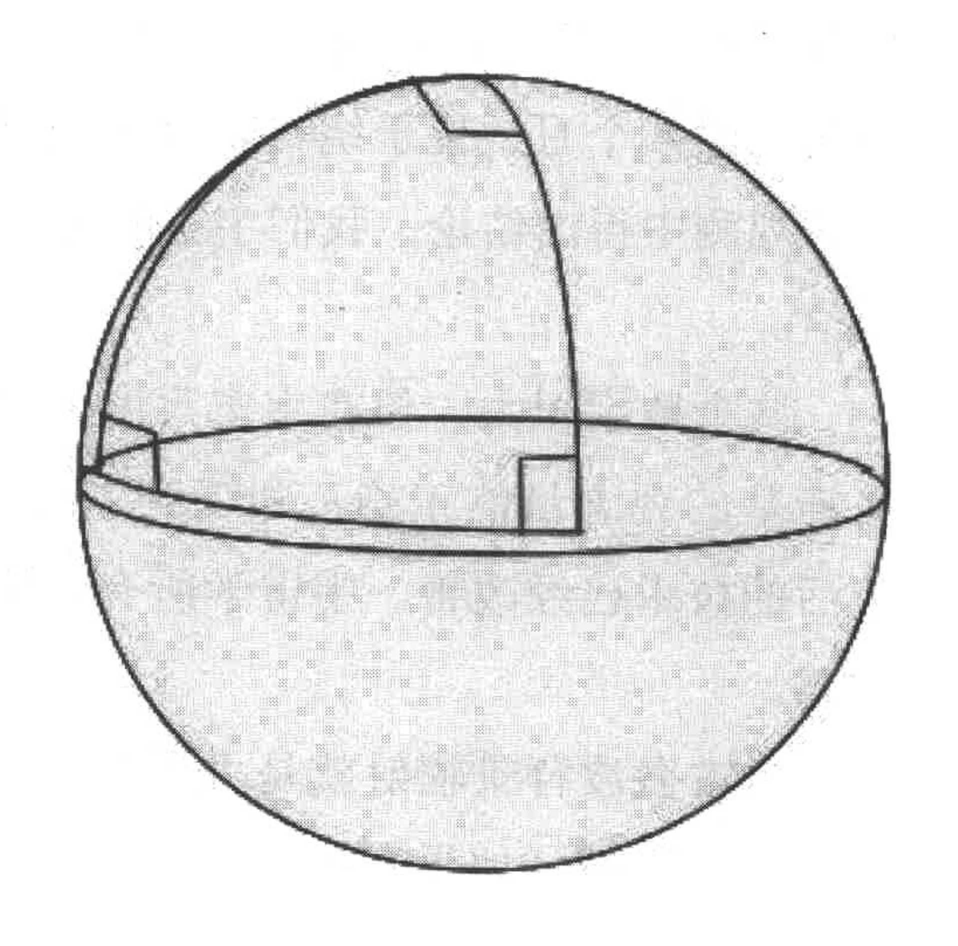
自始至今，永恒存在。

——赞美诗《荣耀颂》（*Gloria Patri*）

如果你考虑测量宇宙总质量，从而推算宇宙曲率，然后运用广义相对论逆推巨大的潜在问题。不可避免，你想知道物质是否以我们无法揭示的方式隐藏了起来。例如，我们通过可见星系和星系团的重力效果，可以探测星系中物质的存在。如果别处存在大质量物体，我们就会错过，不如直接测量整个可见宇宙的几何特征。

但我们怎样才能测量整个可见宇宙的三维几何特征呢？不如从一个更简单的问题开始：如果你既不能环绕地球，又不能从卫星俯窥，应该如何判断地球表面这样的二维物体有没有弯曲？

首先，你可以问高中生：三角形内角和是多少？（仔细选一个高中……最好选欧洲）答案是 180 度，因为学生不会怀疑他学到的欧几里德几何学。你可以在像球面这样弯曲的二维表面上画出三角形，其内角和远大于 180 度。例如：沿着赤道画一条线，然后取直角通向北极，再取另一个直角返回赤道。如下图所示。3 个 90 度内角和



等于 270 度，远远大于 180 度。就是这样！

事实证明：这种简单的二维思想同样直接延伸到三维。第一次发现非平坦，或所谓非欧几何的数学家意识到：三维空间存在同样的可能性。事实上，19 世纪最著名的科学家卡尔·弗雷德里克·高斯（Carl Fredrich Gauss）对宇宙弯曲的可能性非常兴奋，因此，他在 1820 和 1830 年代测量霍亨哈根（Hohenhagen）、伊塞伯格（Inselberg）、布洛肯山峰（Brocken）周围的大三角形，以便判断有没有空间弯曲。当然，这些山峰位于地球曲面上。他探测地球三维空间性质的任何举措，都会受到地表二维曲度的干扰。他肯定早已知道。我推测：他打算从最终结果扣除这些影响，然后判断剩下的曲度是不是空间弯曲的产物。

最终测量空间弯曲的第一人是名气不大的数学家尼古拉·伊万诺维奇·罗巴切夫斯基（Nikolai Ivanovich Lobachevsky），他住在偏远的俄罗斯喀山城（Kazan）。有两个大胆的数学家提出平行线相交的所谓“双曲线”几何学，他是其中之一。值得注意：1830 年，罗巴切夫斯基发表了他的“双曲线”几何学。（我们现在称为“负曲率”、“开放”宇宙。）

罗巴切夫斯基不久就开始考虑：我们的三维宇宙可能是“双曲线”型。他提出：测量星体三角形，就能解决这个问题。他提议：地球间隔 6 个月、位于绕日轨道两侧时，测量明亮的天狼星。他从这种观测中得出结论：我们宇宙的曲率至少是地球轨道半径的 16.6 万倍。

这个数字很大，但在宇宙尺度上微不足道。不幸的是：罗巴切夫斯基的观念虽然正确，却受到当时技术手段的限制。不过，150 年后的技术已经改善。宇宙学所有观测中，宇宙微波背景辐射最为重要。

宇宙微波背景辐射就是大爆炸的余晖，提供了大爆炸确实发生过的直接证据（如果有必要）。我们可以由此直接探测灼热的极早

期宇宙。我们今天所见的一切结构都是后来才出现的。

宇宙微波背景辐射有一个重要事实：发现地点在新泽西（New Jersey），两位发现者完全不知道寻找什么。另一个重要事实是：这个发现几十年来近在咫尺，我们却失之交臂。事实上，你可能年龄足够大、见过当时的效果，只是没有留意。那时有线电视还不存在，频道通常在上午工作时间开始前结束播出，不会整夜播出商业广告。他们停止播出时，屏幕首先显示测试图案，然后变成静电。电视屏幕上百分之一的静电就是大爆炸留下来的！

宇宙微波背景辐射的起源相当简单。宇宙的年龄有限（回溯至137.2亿年前）。我们回溯时间，寻找更遥远的客体（光线需要更长时间才能到达我们）。可以想象：如果我们回溯足够远，就能看到大爆炸本身。从理论上讲，这不是不可能，但从实际上讲，我们和宇宙极早期之间存在一道壁垒。不是房间墙壁这样的物理障碍，但很大程度上效果相同。

房间墙壁不透明，所以我们看不到墙对面。墙壁把光线吸收了。现在，我们回溯时间，宇宙越来越早、越来越热，因为大爆炸以后的温度一直在下降。回溯到30万年前，宇宙温度大约在绝对零度以上3000度（K）。在这种温度下，辐射极其活跃，足以破坏宇宙主要成分氢原子，将之分解为光子和电子。这时中性物质不存在，全宇宙由高密度等离子体组成，等离子体是相互辐射的带电粒子。

不过，等离子体对辐射不透明。等离子体内的带电粒子吸收光子，重新放射。因此，辐射无法通过这样连续的材料。结果是：如果我们回溯时间起源，等离子体占据了宇宙的大部分，构成无法透过的屏障。

又一次，它很像房间的墙壁。我们能看到墙壁，因为墙面原子吸收房内的光线，产生电子。我们和墙壁之间的空气是透明的，因此我们始终能看到墙面发光。宇宙也是这样。我们回溯时间，看到“最近散射光芒的表面”。在这里，质子和电子形成原子，宇宙变成中

性物质。在这后面，宇宙在很大程度上对辐射透明。我们能看到电子吸收光子、重新放射光子，因为宇宙物质变成了中性。

因此，根据大爆炸理论预测："最近散射光芒的表面"从四面八方向我们发出辐射。既然宇宙从那时起已经扩张了1000倍，向我们发射的辐射已经减弱。现在温度大约在绝对零度以上3度（K）。1965年，两位时运不济的科学家在新泽西发现了信号。他们后来因此获得诺贝尔奖。

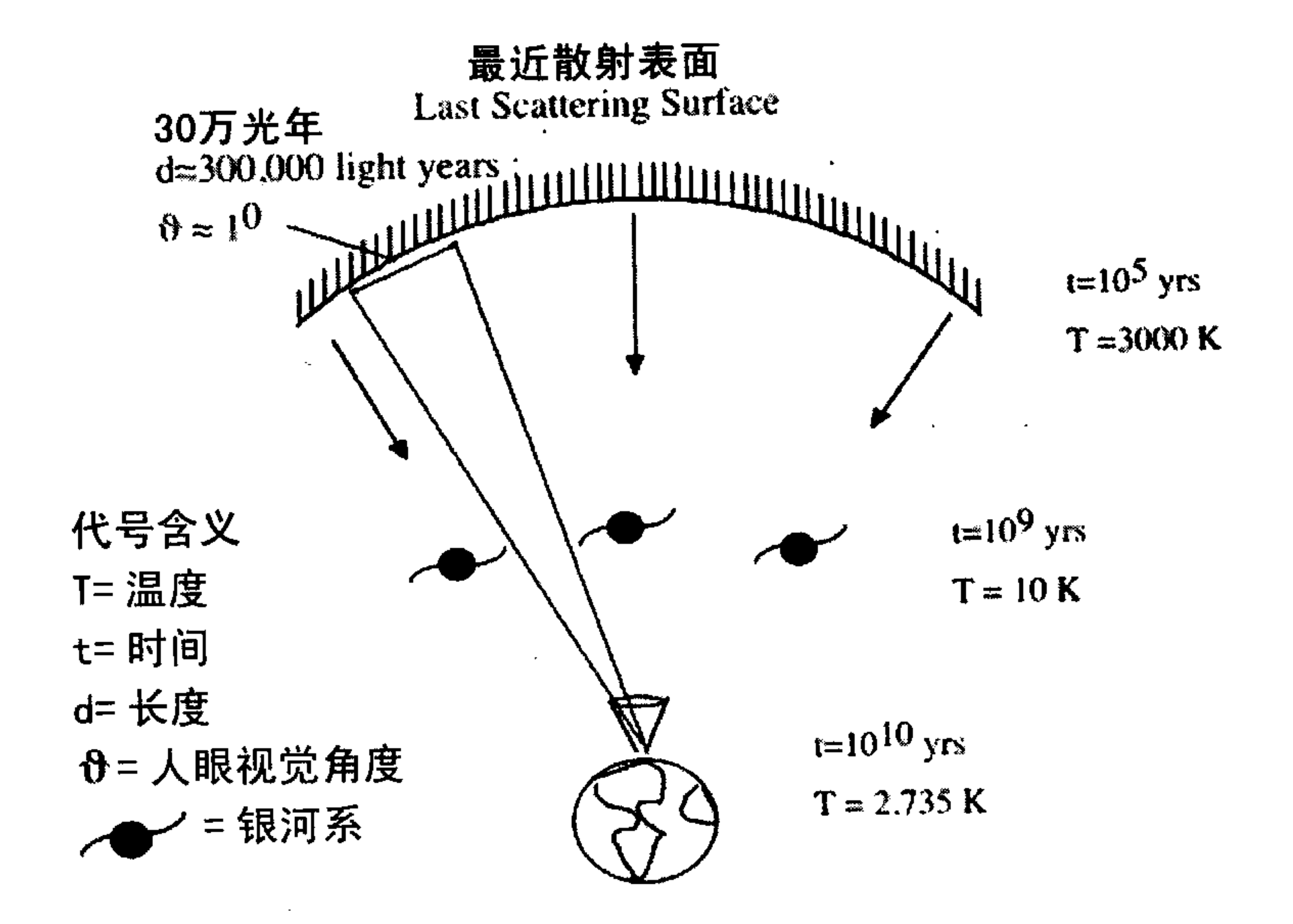
其实，宇宙微波背景辐射的观测在最近获得了第二个诺贝尔奖，理由颇为充分。如果我们能拍摄"最近散射表面"，就会获得30万年前刚刚诞生的宇宙。我们会看到有朝一日形成星系、恒星、行星、类星体和所有其他形态的结构。更重要的是：所有这些结构还没有受到后来动力学演化的影响。这些能量和结构大概是大爆炸极早期的奇异过程创造的，其基本性质和最初的细微扰动经过动力学演化，已经面目全非。

不过，对我们的目的而言，"最近散射表面"最重要的是：其特有的尺度留下了时间的印迹。可以这样理解：地球观察者看到1度的偏离，就对应3000光年的表面。"最近散射表面"反映宇宙30万年前的状况，爱因斯坦说没有任何速度比光更快，因此，30万光年以外不可能有信号。

现在，我们设想一团小于30万光年的物质。这团物质会由于自身重力而崩溃。不过，大于30万光年的物质不会崩溃，因为它甚至不会"知道"自己是团块。重力本身以光速传播，不能穿过整个团块。在卡通片《大路狂奔》（*Road Runner*）里，郊狼威利（Wiley）跳出悬崖、悬在半空中。这种团块就是这样。如果宇宙塌缩的假设正确，只有等到宇宙足够衰老时，它才会崩溃。

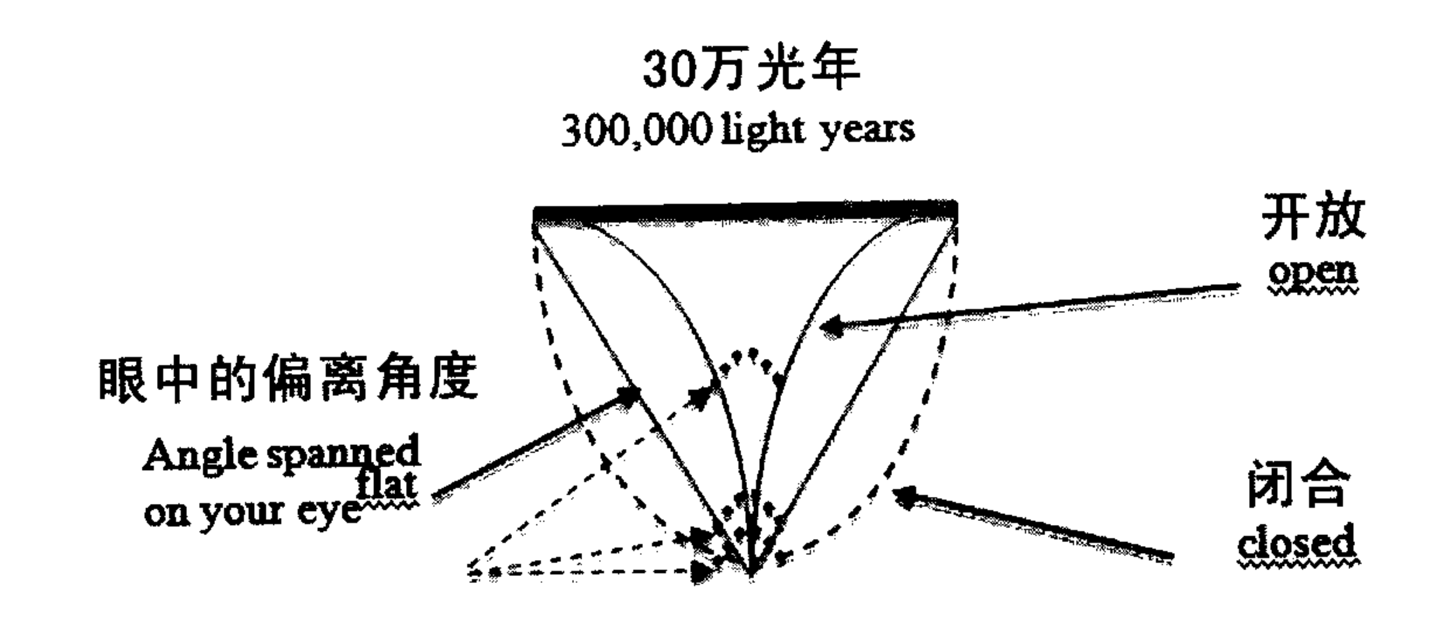
这样画出一个特别的三角形，一边长30万光年。我们和"最近散射表面"之间的距离决定了团块和我们的距离。如下图所示：

最大的物质团块本来会崩溃。在崩溃过程中，微波背景表面上



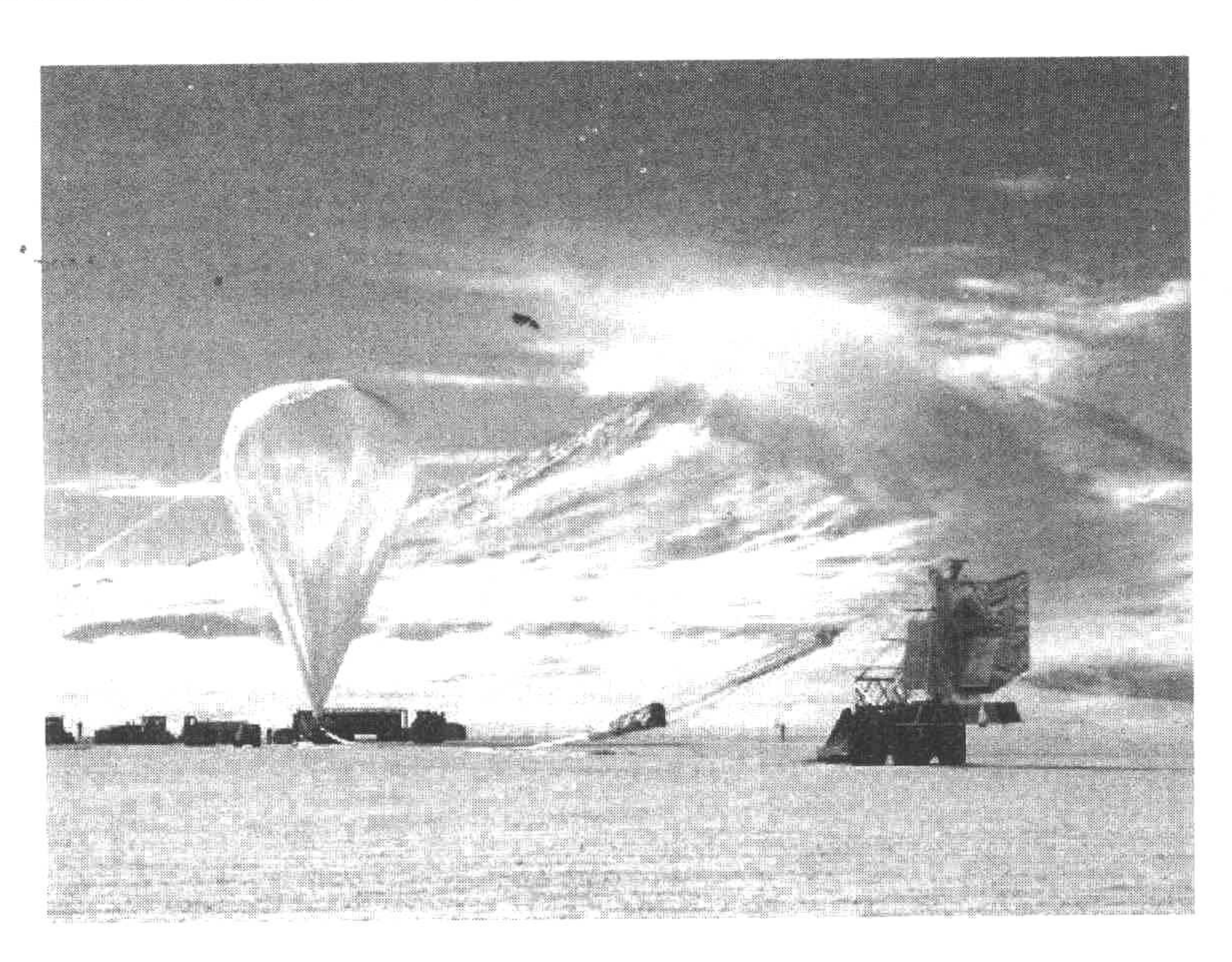
产生热点。观察者发现：团块偏离了上面所示的角度。如果我们这时获得的表面图像如上，就可以预期图像热点通常代表最重要的物质团块。

不过，在这个距离上，偏离角度是不是正好 1 度，取决于宇宙的几何特性。光线在平坦的宇宙中直线前进。然而，在开放宇宙中，光线随时间推移向外弯曲。相反，在闭合宇宙中，光线随时间推移向内聚合。于是，我们的眼睛用一把 30 万光年的尺子测量跨越的角度。尺子位于最近散射表面和我们之间，偏离角度取决于宇宙的几何特征。如下图所示：



这种方法可以直接、清晰地验证宇宙的几何特征。微波背景图最大的热点和冷点仅仅取决于这种因果性。事实上，重力只能以光速传播。因此，当时物质团块崩溃的最大范围仅仅取决于当时光线能够抵达的最远距离。我们看到的偏离角度仅仅取决于宇宙曲率，以固定尺度和固定距离测量。只需要最近的散射表面图就能显示时空的几何特征！

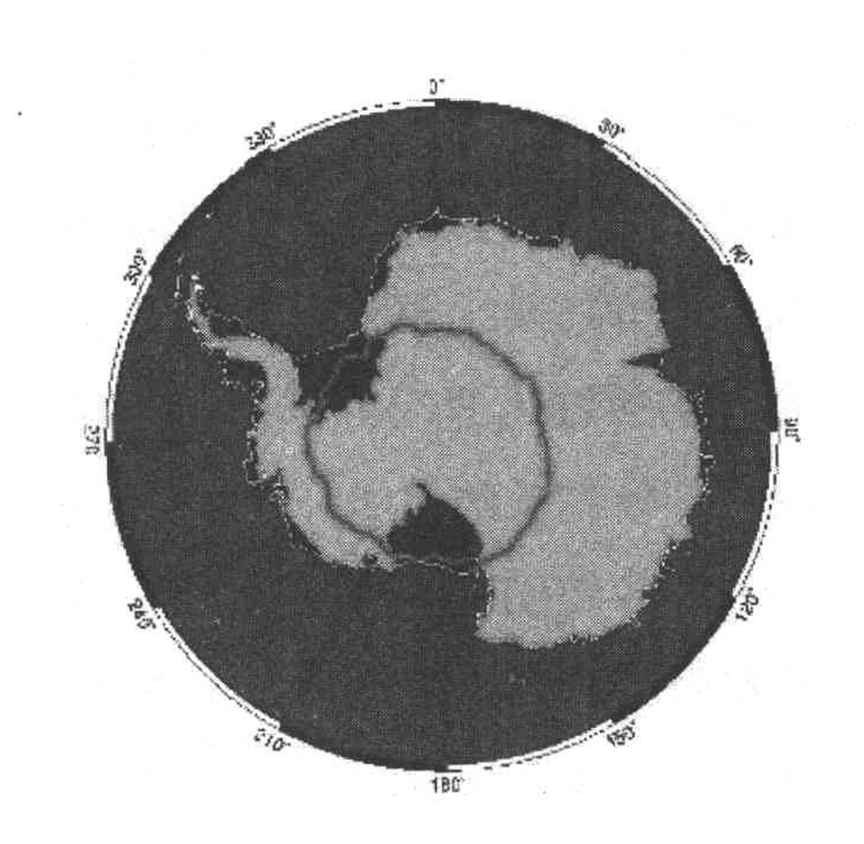
1997年，第一次观测实验在南极洲举行。地基气球“飞去来”（BOOMERANG）号发射。这个名字是“毫微河外辐射和地球物理学观测气球”（Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics）的缩写，用这个名字的原因是图简便。高空气球中的微波辐射计如下图所示：



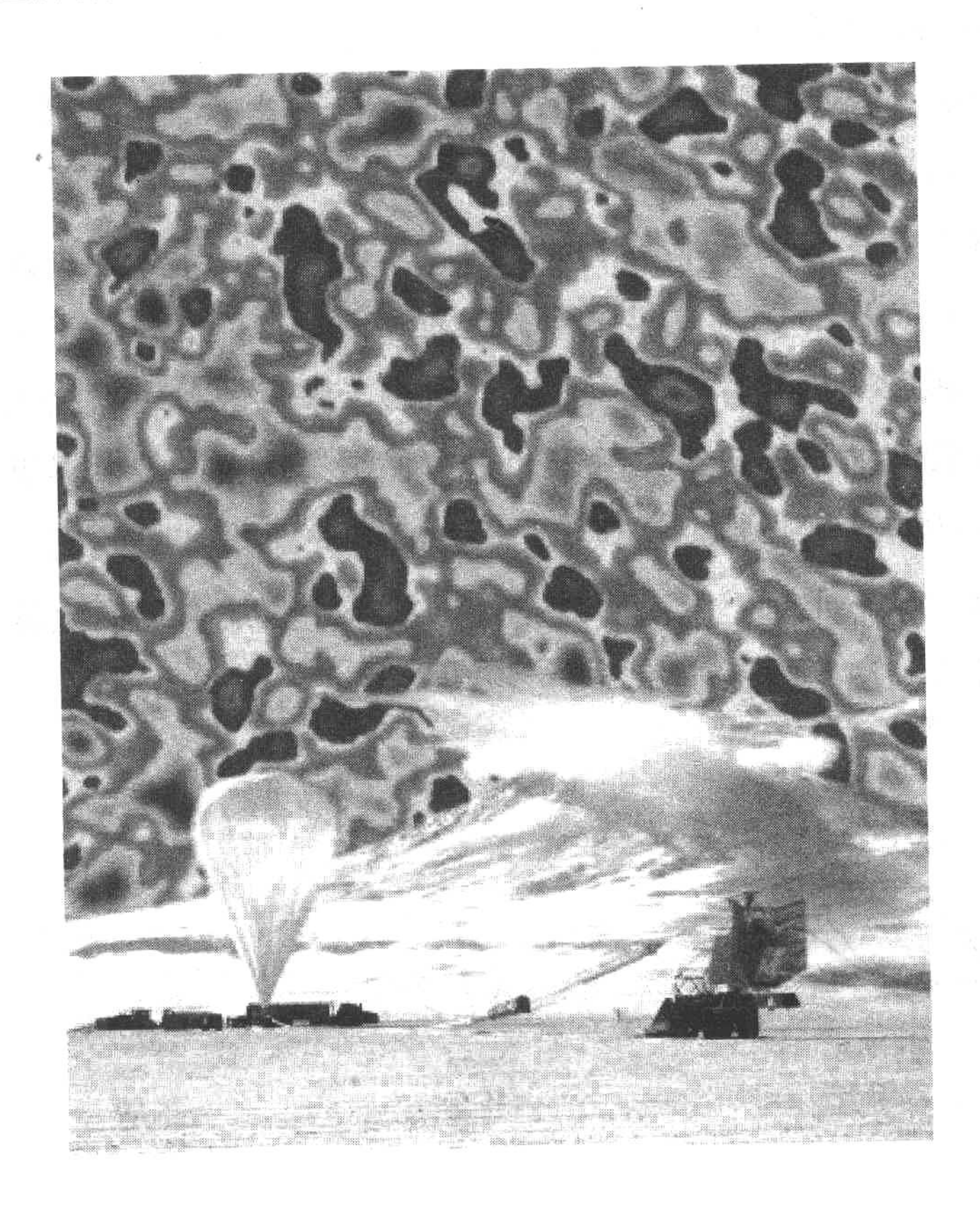
然后，气球环绕世界。在南极地区，这一点并非难事，只需要环绕南极洲就行了。不过，从麦克默多站（McMurdo Station）出发，借助极风环绕南极洲，为时两星期。然后，设备返回出发点，不负“飞去来”名号。

这次气球旅行的目的很简单：观测微波背景辐射。背景辐射反

射在绝对零度以上3度，没有受到更热的地球物质的污染。我们尽可能从地表升高，甚至高于大部分大气层。我们的理想手段莫过于人造卫星，但高空气球可以更廉价地完成许多任务。



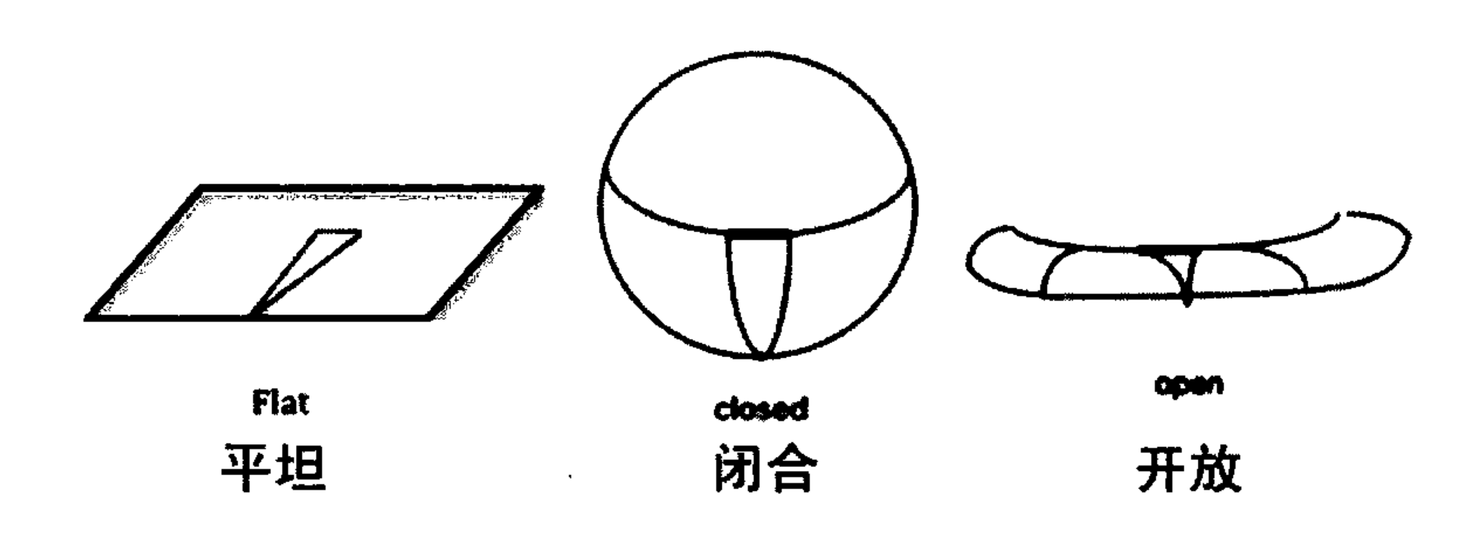
无论如何，“飞去来”号两星期后带回的一小部分天空微波图像显示：最近散射表面产生的辐射图上有热点和冷点。下面是“飞去来”号观测到的图像（深色和浅色分别对应热点和冷点），原始图片上面层层叠加：



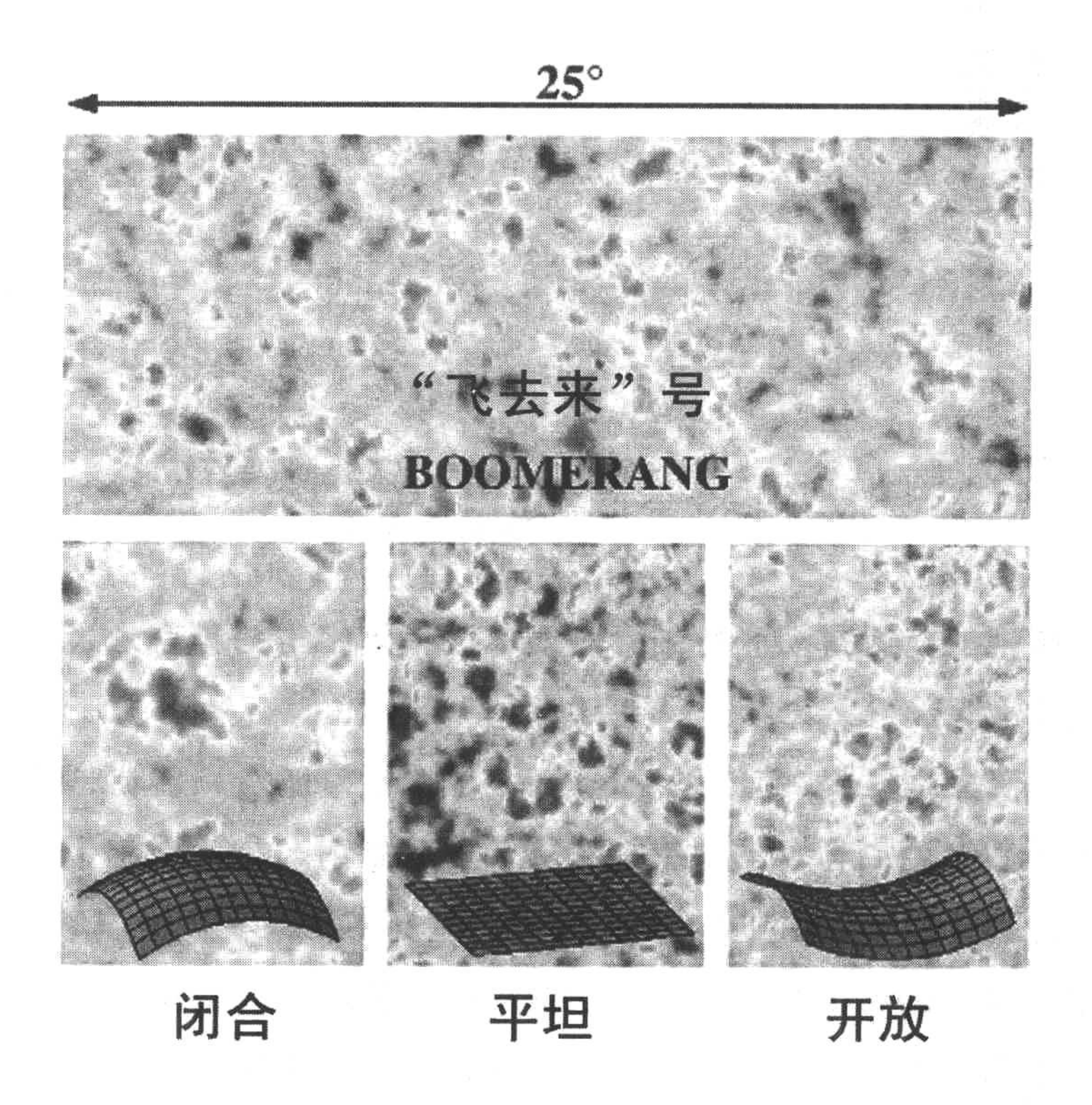
这个图片对我关心的两个问题颇有助益。首先，图片根据“飞去来”号在空中的观测，跟前台图像对比，显示热点和冷点真实的物理尺度。不过，图片也显示了其他重要特征，可以称之为宇宙近视。我们在晴天抬头，看到蓝天，跟前面的卫星图片一样。这是因为我们的进化适应可见光。无疑，太阳表面发出可见光，大气层吸收了其他波长的光线，使之无法到达地球表面。（这对我们是幸事，因为许多辐射对人体有害。）无论如何，如果我们的进化产生了微波辐射的视觉，就会不分昼夜看到天空中的图像。只要我们没有直视太阳，就会直接回溯 130 亿年前最近散射表面的图像。“飞去来”号探测器带回来的图像就是这一个。

幸好“飞去来”号第一次飞行，就产生了这个图像。南极洲的环境危险而且难以预测。在 2003 年的下一次飞行中，由于气球故障和随后的暴风，整个实验完全失败了。他们在最后一分钟决定：在气球飘到无法接近的地点之前，切断气球，在南极洲平原展开搜索，恢复了装有科学数据的密封容器。

我在解释“飞去来”号获得的图片以前，首先进一步强调：图片上热点和冷点的尺度取决于宇宙的几何特征。“飞去来”号真实图片记录的热点和冷点物理尺度，取决于最近散射表面相关的单一物理进程。简单的二维比喻有助于解释结果。在二维世界里，球形表面是闭合几何形体，马鞍形是开放几何形体。如果我们在这些表面上画一个三角形，就会看到描述的后果：直线在球面上聚合，在马鞍分离，在平面上平直。

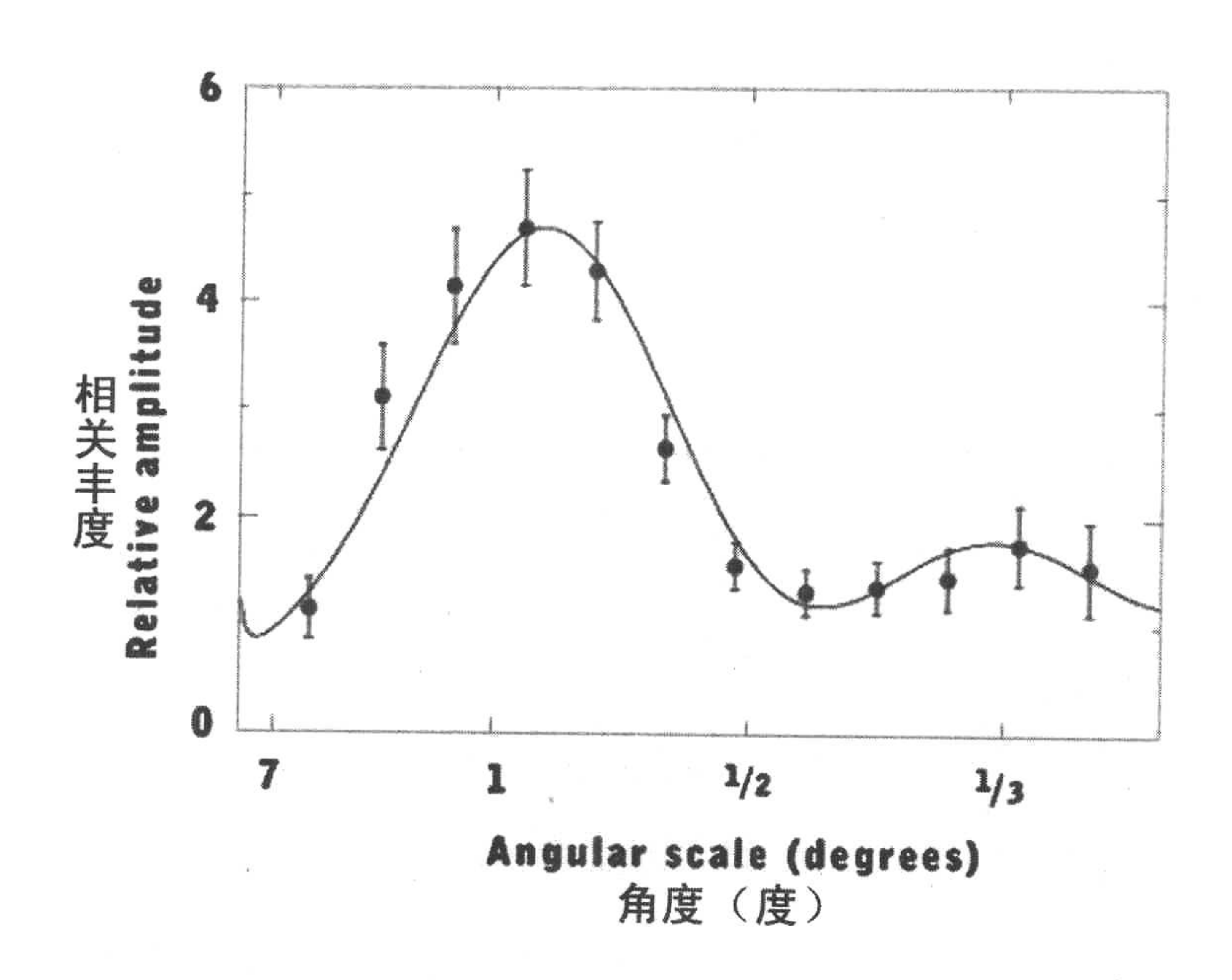


因此，现在的问题关系重大："飞去来"号图像的热点和冷点有多大？"飞去来"号为了解决这个问题，用计算机模拟开放、闭合、平坦宇宙的热点和冷点图案，与真实的微波天空图（另一种虚拟色）比较。



如果你检查左下方模拟闭合宇宙的图案，就会发现平均热点和冷点大于真实宇宙。在右面，平均热点和冷点小于真实宇宙。不过，正如金发姑娘的故事，中间的图案对应模拟平坦宇宙，"恰到好处"。理论家希望：虽然星系群测量的估计值跟数学上美丽的宇宙模型有极大冲突，但后者能够获得观察证实。

事实上，"飞去来"号图像跟平坦宇宙的预测高度吻合、几乎不可思议。"飞去来"小组研究这些热点和冷点，观察最大的斑点有时间在最近散射表面上向内塌缩，产生了下面的图表：



图上的点就是观测数据。实线代表平坦宇宙的预言，最大团块接近 1 度！

“飞去来”号实验结果发布以后，美国国家航空和宇航局（NASA）发射了敏感度高得多的卫星探测微波背景辐射，称为威尔金森微波各向异性探测器（WMAP），根据已故普林斯顿大学的物理学家大卫·威尔金森（David Wilkinson）的名字命名。威尔金森是普林斯顿大学的第一批物理学家，他们本来可能首先发现微波背景辐射，但



贝尔实验室（Bell Labs）抢先了一步。2001年6月，威尔金森微波各向异性探测器（WMAP）发射。探测器到达地球背对太阳一面的150万英里上空，观测没有受到阳光污染的天空辐射。探测器用了7年多时间，绘制了空前精确的天空微波总图。（“飞去来”号受到下面地球的干扰，只有部分天空微波图。）

在图中，整个天空都投射到一个平面上，犹如地球投射为平面地图。银河系平面位于赤道。银河系平面上方90度是北极，下方90度是南极。不过，图中移除了银河系图像，这样，图片就仅仅反映最近散射表面了。

我们有了这样精密的数据，就可以更精确地测定宇宙的几何特征。威尔金森微波各向异性探测器（WMAP）的成果和“飞去来”号的成果对比，证实我们的宇宙接近于平坦宇宙不超过百分之一！理论家预测准确无误。我们又一次不能忽视：这个结论跟前一章结尾的结论明显不协调。测量星系和星系团的质量，得出的宇宙曲率比平坦宇宙小百分之三。一定有我们忽视的因素存在！

理论家可以拍拍自己的背，猜测宇宙是平坦的。几乎没有人预料到，大自然会给他们来一个出其不意：根据质量推测、直接测量曲率，两种方法的结果相互冲突。一点都没有夸张，平坦宇宙必须的失踪能量就隐藏在我们的鼻子底下。

第四章　无中生有

简洁至上。

——无名氏

我们研究宇宙，精确测量其特性，似乎总是进一步、退两步。即使观察最终确定了宇宙曲率（证实早就存在的理论猜想），即使宇宙物质超过质子和中子估计值的10倍，再加上大量的暗物质，还是只能满足平坦宇宙所需质量的百分之三十，完全满足不了宇宙所需的所有能量。直接测量宇宙曲率，结果发现平坦宇宙所需的百分之七十质量没有着落。星系内外，甚至星系团内外都没有！

厘清事实，就不至于如此震惊。甚至在这些测量宇宙曲率、确定宇宙所有星系团质量（参见第二章所述）的实验以前，就有一些迹象说明：传统的宇宙图景不符合观测证据，平坦宇宙需要的暗物质3倍于我们已知的数量。事实上，我早在1995年就和芝加哥大学（University of Chicago）的同事迈克尔·特纳（Michael Turner）写过一篇离经叛道的论文，提出传统宇宙图景并不正确。其实，只有一种可能性能协调平坦宇宙（我们当时的理论偏好）和星系团内部动力学的观测值：宇宙的奇异程度远远超过我们的预料。我们必须回到阿尔伯特·爱因斯坦1917年提出的疯狂理论，解决理论预测和平坦宇宙的矛盾。他认为我们生活在平坦宇宙中。人们抛弃这种理论已经很久了。

据我记忆，我们当时的动机主要是指出流俗的谬误，而非提出明确的解答方案。我们的提议似乎疯狂到难以置信。3年后，事实

证明：我们的理论居然完全正确。我们自己比谁都惊讶！

我们回顾 1917 年。爱因斯坦已经提出广义相对论，预测水星进动成功。虽然他认为我们生活在静态宇宙中，而他的理论解释不了，他仍然颇为欣慰。

他如果有更大的勇气，本来可能会预测到宇宙并不平坦。但他没有。相反，他意识到：在理论上稍作修改，就能完全协调产生广义相对论的参数和表面上平坦的宇宙。

细节复杂，而爱因斯坦广义相对论方程式的一般结构相对简单。方程式左侧描述宇宙曲率，万有引力以此作用于物质和辐射。方程式右侧的数据反映宇宙中各种物质和能量的总密度。

爱因斯坦意识到：只要在方程式左侧增加一个小小的常数，就会增加小小的额外排斥力，遍及全部空间。遥远星体的距离增加时，相互之间的吸引力减少，宇宙常数补充了万有引力的作用。宇宙常数如果足够小，其效果在人类尺度，甚至星系尺度上就会无法探测。在这些层面上，牛顿定理的效果显而易见。但他推论：宇宙常数遍及全部空间，因此足以超越星系尺度，对抗极遥远星体之间的万有引力。他由此推论：这样就能产生最大尺度上的静态宇宙。

爱因斯坦称这个额外常数为宇宙项，因为它仅仅是方程式上一个稳定的附加值，但传统称之为宇宙常数。

爱因斯坦一旦意识到宇宙膨胀，就取消了这个宇宙项。他说，在方程式上增加这个常数是他最大的错误。

不过，摆脱宇宙项并非易事。这很像将挤出来的牙膏重新挤回去，因为我们今天的宇宙常数已经面目全非。因此，即使爱因斯坦没有增加常数，在此期间，也会有别人这么做。

把爱因斯坦的宇宙项从方程式左边移到右边，在数学上是一个小步骤，在物理学上却是一次飞跃。这种操作在数学上微不足道。一旦宇宙项移到方程式右边，所有各项都会增加宇宙中存在的能量，宇宙图景就会完全不同。也就是说，宇宙总能量会由此增加。不过，

宇宙项的内容是什么？

答案是：无。

无。我不是指一无所有，而是指我们通常所说的真空。也就是说：如果我取一部分空间，移除空间内的一切：尘埃、气体、人类，甚至通过空间的辐射，也就是清除里面所有的东西，如果剩下的空间仍然有分量，那么，爱因斯坦这一类宇宙项就可能存在。

这样一来，爱因斯坦的宇宙项就显得更疯狂了。任何大四学生都会告诉你：真空含有多少能量，即使他们不知道那是什么能量。答案一定是真空。

还有，大部分大四学生没有学过量子力学。爱因斯坦广义相对论和量子理论并用，宇宙真空就比以前更奇特了。甚至物理学家第一次发现和分析这种新现象时，都难以相信它存在于真实的世界上。

英国理论物理学家保罗·狄拉克（Paul Dirac）才华横溢、风格简洁，第一个整合了广义相对论和量子力学理论。他也是发展量子力学的领军人物。

1912-1927 年是量子力学的发展期，标志性人物是丹麦天才科学家尼尔斯·波尔（Neils Bohr）、奥地利少壮派科学家欧文·薛定谔（Erwin Schrödinger）和德国物理学家维纳·海森堡（Werner Heisenberg）。波尔首先提出量子一词，薛定谔和海森堡在数学上予以精练。量子力学蔑视一切基于人类尺度经验的常识。波尔首先提出：电子在轨道上环绕原子核，就像行星环绕太阳。他还证明了原子可见光谱（不同元素的发光频率）的规则：电子只能固定在几个“量子能级”的稳定轨道上，不可能以螺旋形轨道落入原子核。电子在吸收和释放的能级之间移动，依据不连续频率或光量子。1905 年，马克斯·普朗克（Max Planck）首先提出光量子概念，用来解释热体辐射。

不过，波尔的“量子定理”非常特别。1920 年代，薛定谔和海森堡各自独立提出：如果电子动力学不同于宏观物体，就可以从初

始原则得出这些定理。电子有波粒二象性，似乎遍布空间各处（薛定谔的电子“波动函数”）。电子属性的测量结果只能提醒概然性，不同特性不可能同时精确测量（海森堡的“测不准原理”）。

海森堡提出描述量子机制的数学方法（他因此获得1932年诺贝尔奖）。拉狄克显示：经典宏观物体众所周知的力学定理可以仔细地推出海森堡方程式。而且，他后来还显示：薛定谔的“波动力学”数学也可以这样推出，跟海森堡方程式完全等价。但拉狄克也了解：波尔、薛定谔和海森堡的量子力学只适用于牛顿定理，而非爱因斯坦的相对论。量子体系由经典物理学定理推出。

拉狄克喜欢数学语言，甚于图像。他致力于整合量子力学和爱因斯坦相对论，玩弄各种方程式。这些方程式包括复杂的多元数学体系，体现电子的自旋性质。也就是说：电子像小陀螺一样旋转，有规律地运动，还会围绕任何轴线顺时针或逆时针旋转。

1929年，他获得成功。薛定谔方程式漂亮而精确地描述了比光速慢得多的电子运行。拉狄克发现：如果他将薛定谔方程式修改为更复杂的方程式，使用矩阵模式（实际上意味着他的方程式描述4种不同的耦合方程式），就能整合量子力学和相对论。由此，比较快的电子运行大体上也能描述。

不过，还有一个问题。拉狄克撰写的方程式描述电子和电磁场的相互作用。但他的方程式似乎也需要新粒子存在。新粒子跟电子类似，但与电荷相反。

那时，已知的大自然基本粒子中，只有一种粒子的电荷跟电子相反：质子。但质子根本不像电子。首先，它们重了2000倍！

拉狄克感到困惑。他有一次不顾一切地论断：新粒子其实就是质子，只是通过空间时相互作用，显得更重。其他人（包括海森堡）没有用多长时间，就阐明他这个提议毫无意义。

大自然不久就施以援手。拉狄克提出他的方程式不到2年时间，他就认输、承认：如果他的理论正确，新粒子一定存在。1年后，

实验者在轰击地球的宇宙射线中发现了新粒子的证据。新粒子性质与电子相同，携带电荷相反，称为正电子。

拉狄克获得证明，但他也承认：他原先对自己的理论缺乏信心。他后来说：他的理论比他自己聪明！

我们现在称正电子为电子的“反粒子”。因为事实证明：拉狄克的发现普遍适用。电子必须有反粒子，自然界所有基本粒子也一样。例如，质子就有反质子。甚至某些中性粒子也有反粒子，例如中子。粒子与反粒子相遇，就会湮灭为纯粹能量。

这一切可能听起来像科幻小说（反物质确实是“星际迷航”的要角），全世界大型粒子加速器一直在产生反粒子。反粒子在其他方面的特征与粒子相同。因此，反物质世界理应与物质世界一模一样。反情人坐反汽车，在反月亮下做爱。我们生活在物质世界，而不是地丑德齐的反物质世界，这仅仅是出于偶然，而非我们后面讨论的深远因素。我要说：反物质的古怪就像比利时人的古怪一样。不是真正的古怪，只是你少见多怪！

反物质存在，可观测宇宙由此更有趣了，但真空由此变得更复杂。

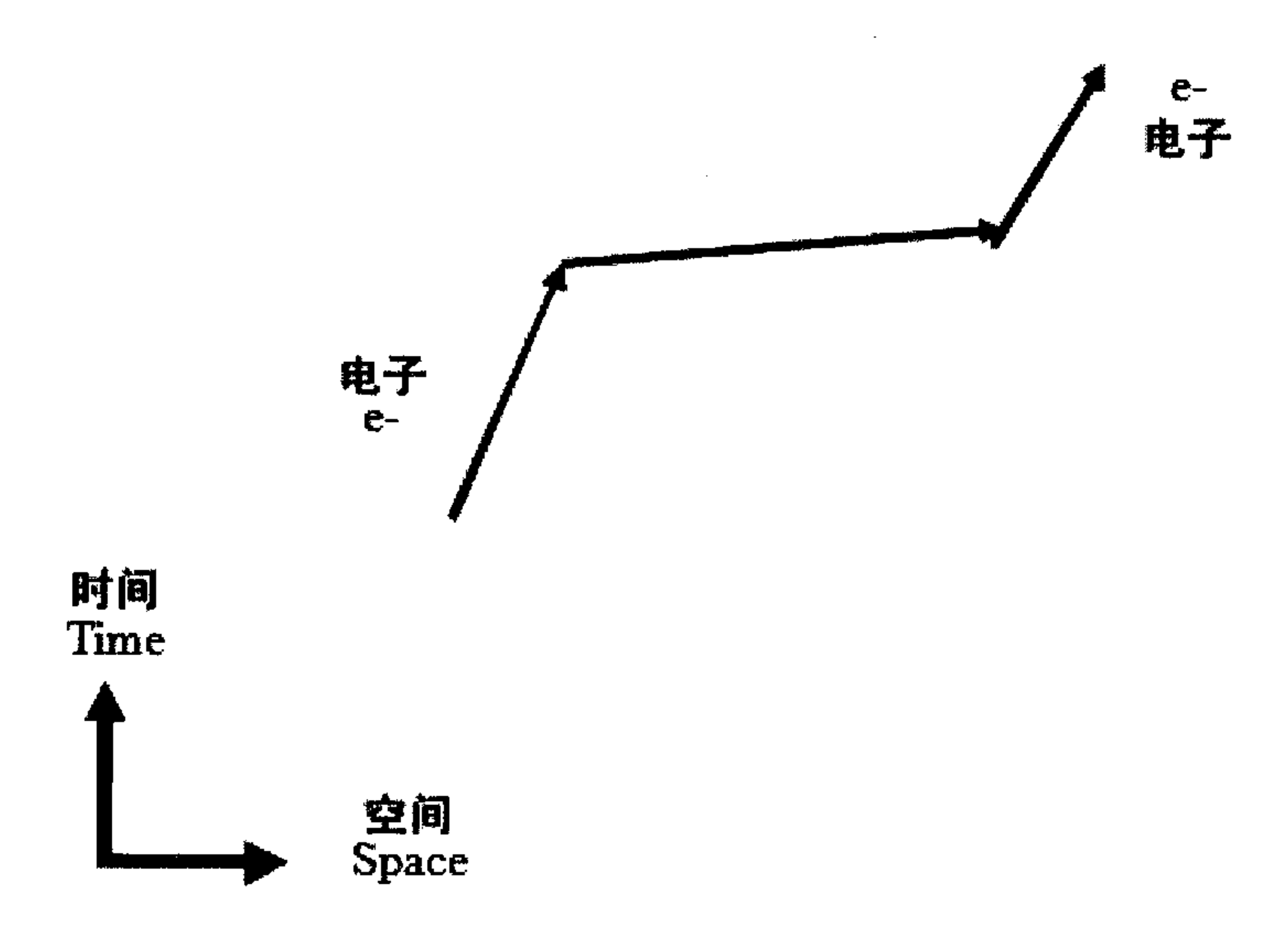
传奇物理学家理查德·费曼（Richard Feynman）率先为相对论需要反物质存在提供了直观的理解，还用图形证明真空其实不空。

费曼意识到，相对论告诉我们：观察者以不同速度运动时，测出的距离和时间不一样。例如：物体高速运动，时间就会变慢。如果物体不知怎样超过了光速，时间就会逆转。光速之所以公认为宇宙极限速度，这是原因之一。

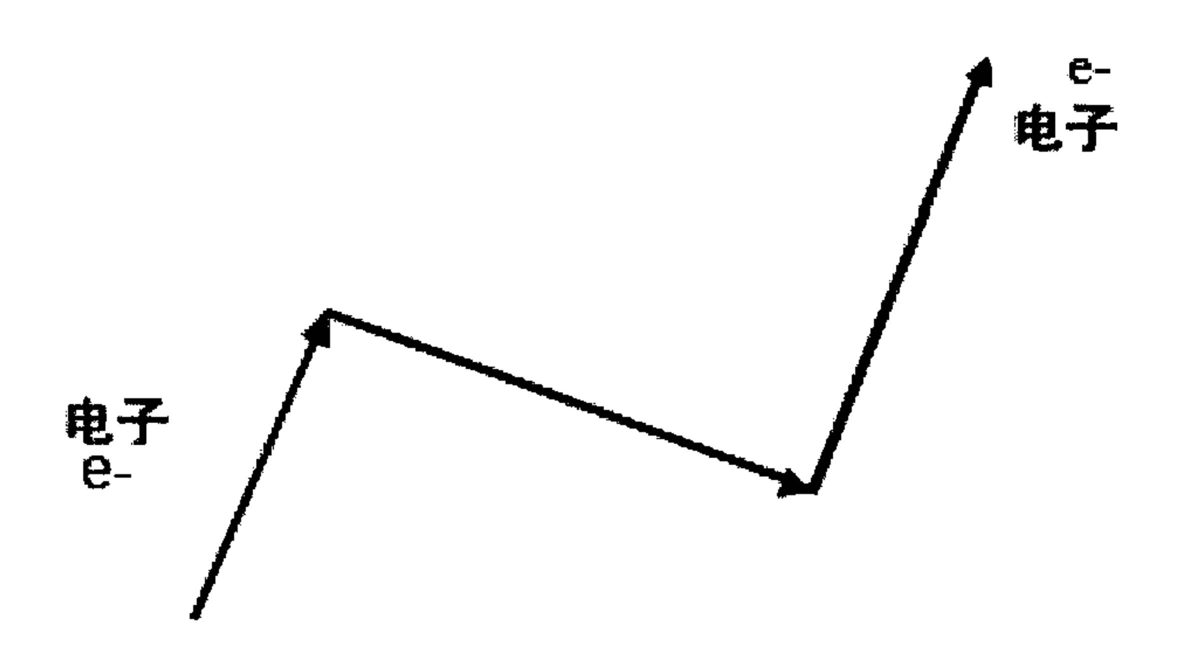
不过，海森堡测不准原理是量子力学的关键原理之一。粒子的位置和速度不可能同时精确测定。在确定的精确时间测量既定体系，二者只能择一，总能量无法确定。

所有这一切都暗示，量子力学允许这种可能性：在你无法精确测量的极短时间内，粒子仿佛超过了光速！然而，如果粒子超过光速，根据爱因斯坦相对论，就会有回溯时间的表现！

费曼大胆地接受了这个疯狂的可能性，认真探索其意义。他绘制了下面的电子运动图：电子在运动中周期性超过光速。

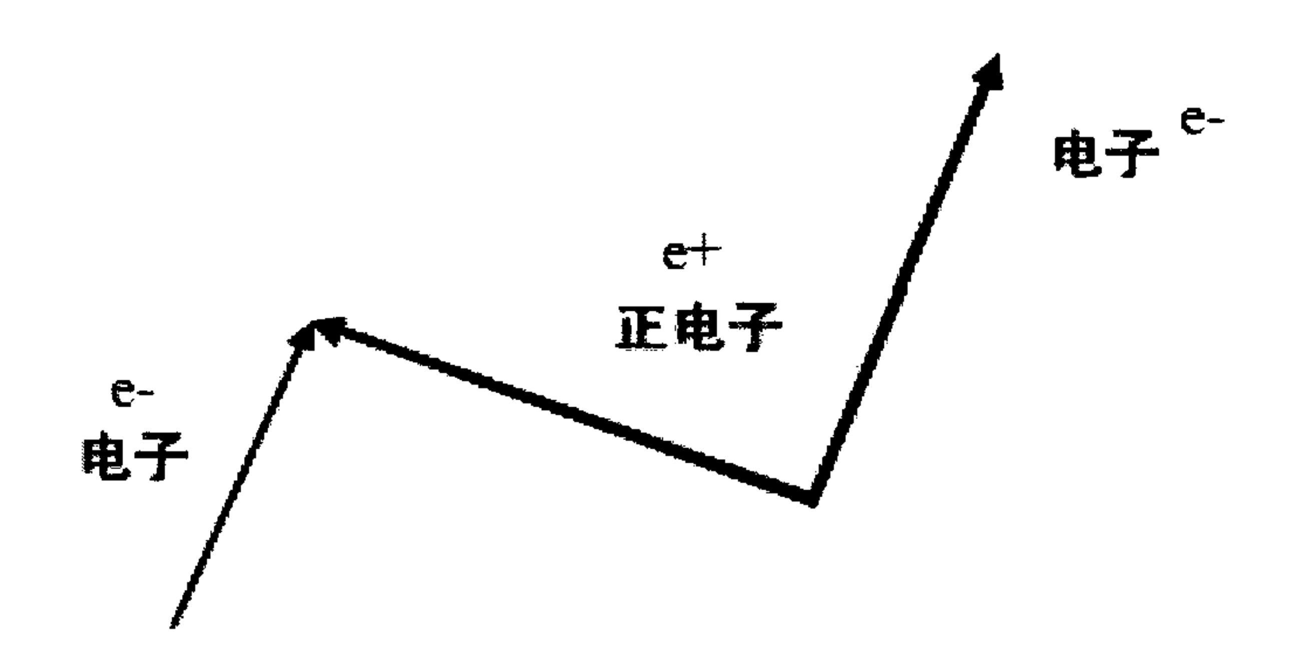


他承认相对论的说法：别的观察者测量的尺度不同，如下图所示。电子在时间中向前移动，向后移动，再向前移动。

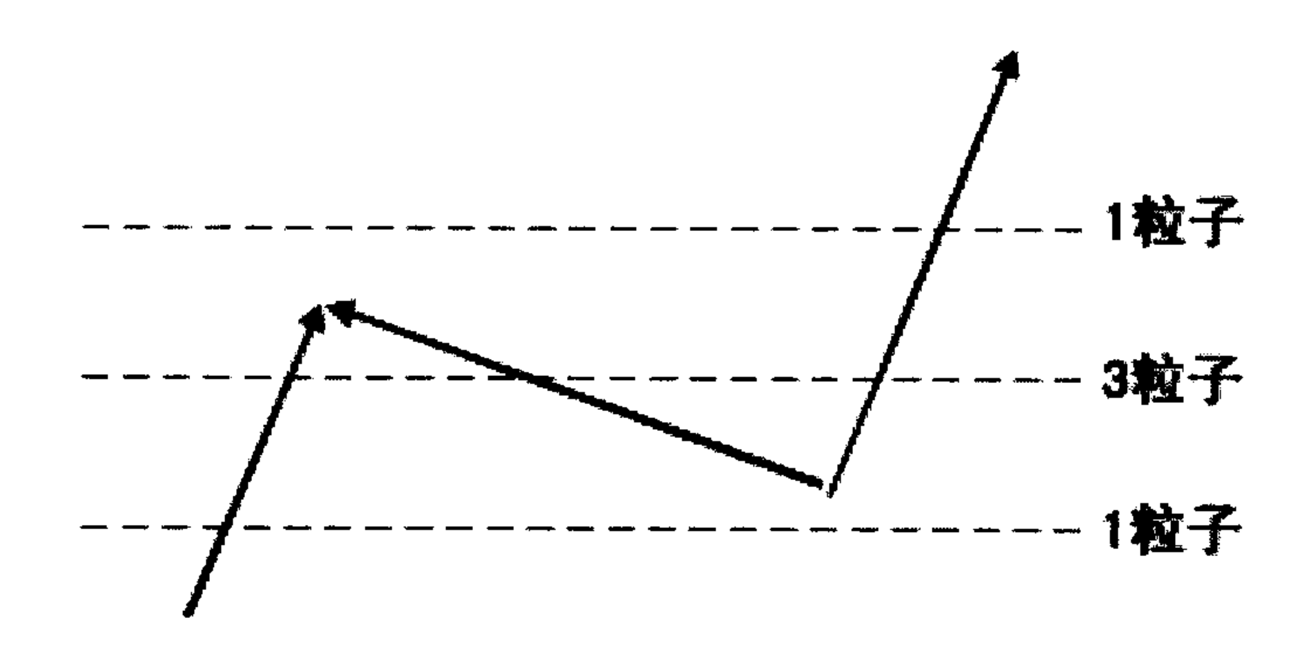


不过，负电荷在时间中回溯，在数学上等价于正电荷在时间中前行。由此，相对论要求正电粒子的质量和其他特性与电子相同。

在这里，我们可以重新解释费曼的第二张图。单个电子向前移动。然后，在空间中另一点，正电子对从真空中创造出来。接下来，一个正电子与原先的电子相遇、湮灭。然后，剩下的单个电子向前移动。



如果你不嫌烦，就考虑一下：在短期内，即使从单个粒子开始，以单个粒子结束，仍然一度有 3 个粒子活动。



在此期间，至少在极短期内，无中确实生有！费曼在 1949 年的论文《正电子理论》（*A Theory of Positrons*）中，用战争时期的开心比喻，漂亮地描绘了这个明显的悖论。

> 这就像投弹手从低飞的舱口监视一条道路，突然看到三条道路。两条路汇合，一条路消失。他又一次沿着一条长路继续前进。

只要“继续前进”的时间很短，我们就不能直接测量所有粒子。量子力学和相对论提示：这种奇异的情况就可以发生，有必要存在。

这些粒子出现和消失的时间尺度极其短暂，无法测量，称为虚拟粒子。

真空产生一系列无法测量的新粒子，这种理论听起来好像“大批天使在针尖上跳舞”一样虚无缥缈。如果这些粒子没有其他测量方法，这种观念就非常虚弱。不过，这些粒子虽然不能直接观测，但事实证明：其间接效果产生了今天我们体验的宇宙的大部分特性。不仅如此，这些粒子的影响可以比其他科学运算更精确地测量。

例如，氢原子就是这样。波尔首先用量子理论解释氢原子；薛定谔因此推导他的著名方程式。量子力学的妙处在于：能够解释氢原子加热发光的特殊颜色。量子理论认为：电子只在不连续的能级上环绕质子。电子在不同能级之间跃迁时，发出或吸收固定频率的光波。薛定谔方程式预测的频率几乎完全正确。

（但还不是完全正确。）

更仔细观测氢原子光谱，就会发现它比以前的估计更复杂。观测的能级之间存在小裂隙，称为“光谱精细结构”。波尔时代就已经观测到这些裂隙，猜测可能跟相对论效应有关。相对论完全推出后，这种猜测才得以证实。幸而拉狄克方程式提高了薛定谔方程式的预测值，重现了一般性观测结构，包括精细结构。

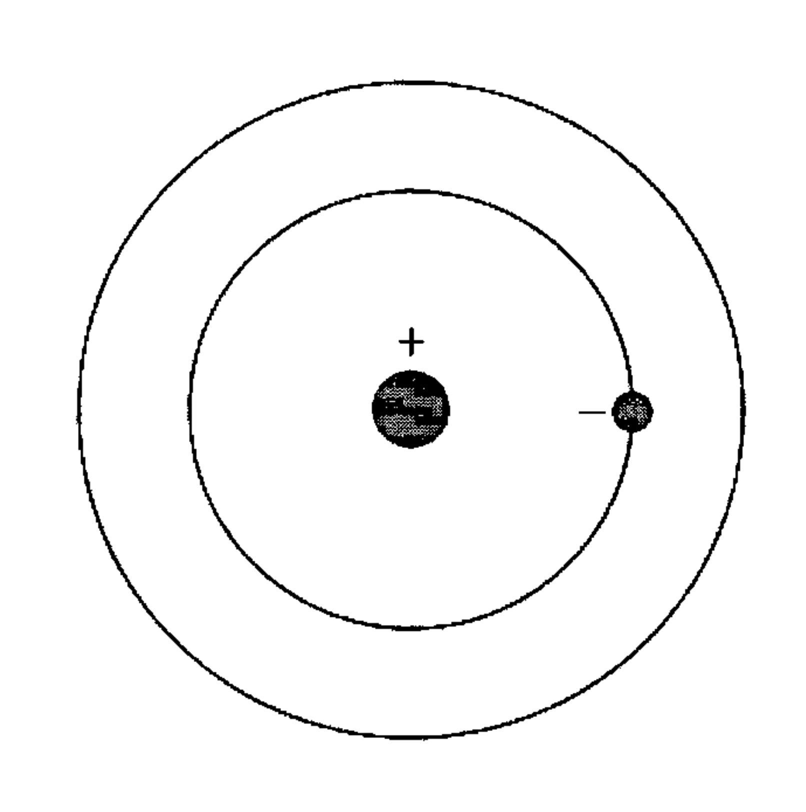
至此一切顺利。但 1947 年，美国人威利斯·兰姆（Willis Lamb）及其学生理查德·罗瑟福德（Richard Retherford）做了实验，证明其在其他方面似乎难以置信地缺乏合理动机。他们意识到：他们有能力测定氢原子能级，精确到一亿分之一。

他们为什么要费这个事？哎，实验家只要发现了测量大大提高精确度的新方法，就常常按捺不住、付诸实施。新发现往往源于这种进程。1676 年，荷兰科学家安东尼·菲利普·凡·列文虎克（Antonie Philips van Leeuwenhoek）第一次用显微镜看到：貌似一无所有的水中存在生命，其动机就是这样。这一次，实验者无论如何有更直接的动机。在兰姆以前，实验精度不足以验证拉狄克预测的细节。

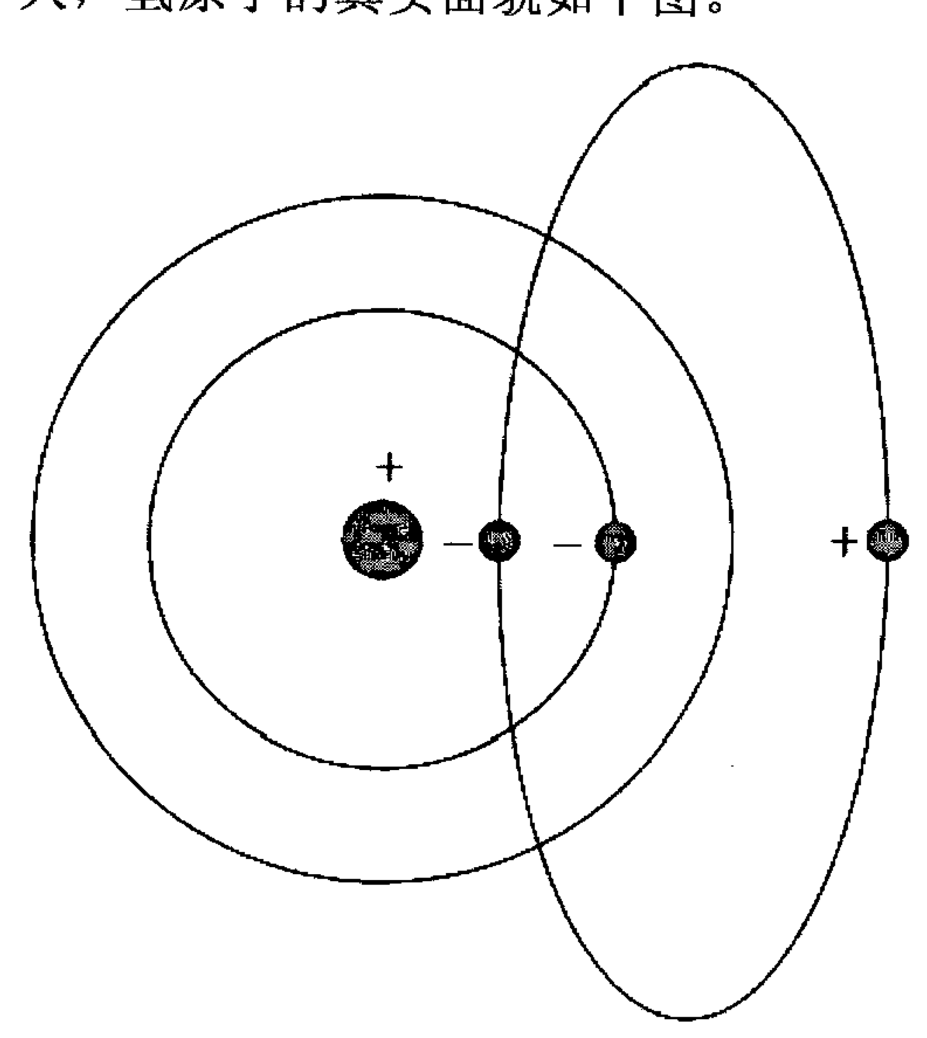
拉狄克方程式确实重现了新观测的一般性结构，但兰姆考虑的关键问题是：预测的细节是否重现。这是验证理论的唯一方法。兰姆的实验在大约十亿分之一百的水平上，似乎提供了错误的答案。这个水平远远超过参数的敏感性。

这样细微的实验误差似乎无关紧要，但拉狄克理论预测最简单的诠释都明白无误，实验同样清晰，两种结果却不一样。

以后几年，最好的理论物理学家投入论战，试图解决这种矛盾。大量工作产生了答案。尘埃落定时，人们意识到：其实拉狄克方程式已经提供了精确答案，但必须将虚拟粒子考虑进去。这可以由以下图解表示。化学课本通常将氢原子画成下面这样：质子在中间，电子环绕周围，在不同能级之间跃迁。



不过，一旦电子－正电子对从真空中自发产生，在极短时间内彼此湮灭，不久，氢原子的真实面貌如下图。



电子－正电子对画在图面底部，在顶部湮灭。虚拟负电子离质子更近，正电子距离较远。无论如何，从画面上可以看出：在任何情况下，真实的氢原子电荷分布都不仅仅是质子和电子这样简单。

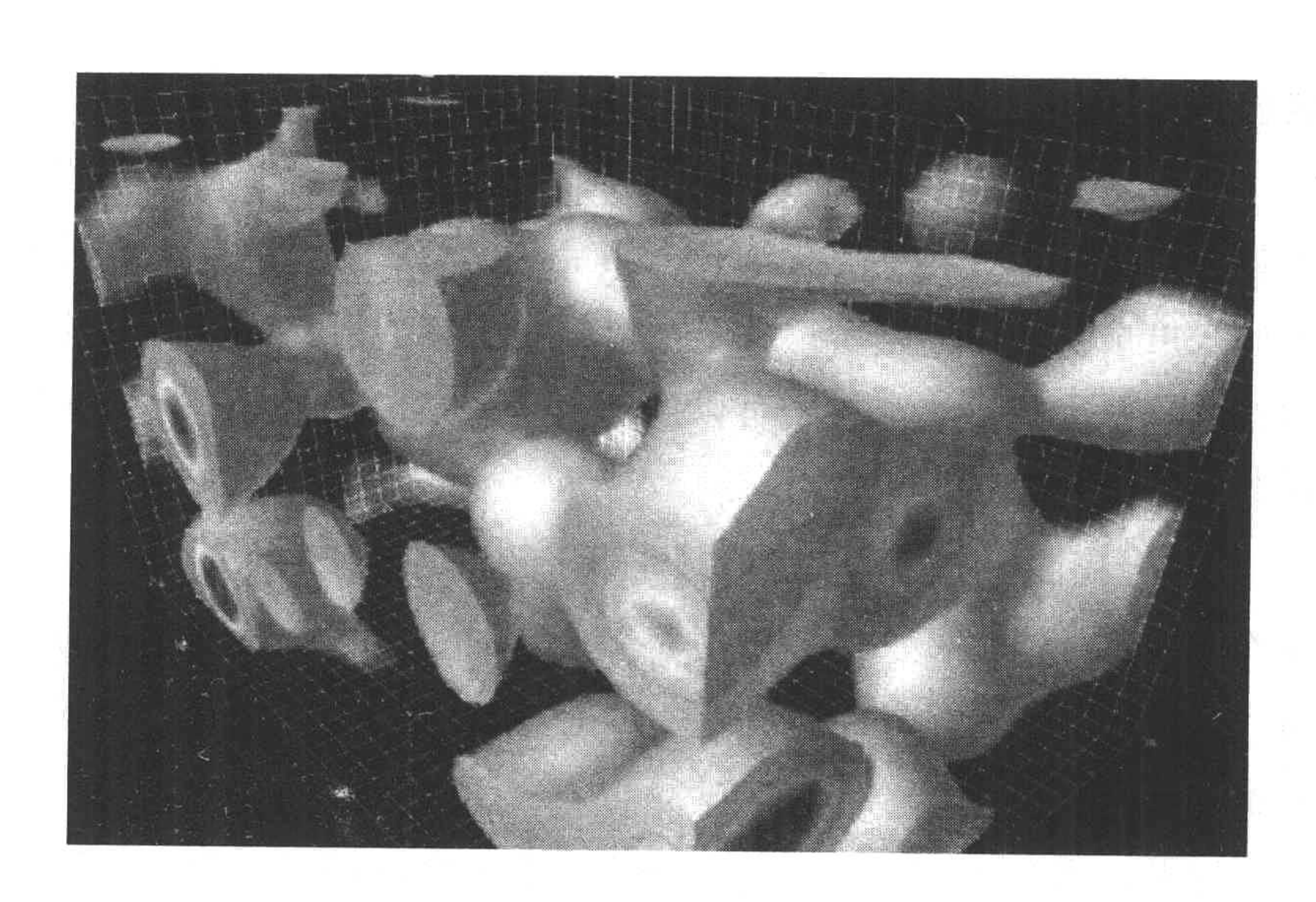
值得注意：（在费曼和其他人的艰苦工作后）我们物理学家已经明白：氢原子光谱受到可能在附近间歇存在的虚拟粒子影响，运用拉狄克方程式，可以算出随便多么精确的数值。由此，我们获得了最好、最精确的科学预测值。相形之下，其他所有科学预测都显得苍白无力。在天文学上，最近的宇宙微波背景辐射观测允许我们的预测精确到十万分之一。不过，我们运用拉狄克方程式和虚拟粒子存在的假设，计算原子参数，对照观测值，吻合精确度高达十亿分之一，甚至更好！

因此，虚拟粒子是存在的。

原子物理学惊人的精确度无可匹敌。不过，虚拟粒子在另一个地方也起到了重要作用，可能跟本书的核心主题关系更大。事实证明：它们产生了宇宙大部分质量，也是宇宙万物可见的原因。

1970 年代，我们对物质本性的理解有了一大突破：产生了精确描述夸克相互作用的理论。你自己和你看到的万物都由质子和中子组成，质子和中子都由夸克组成。相关的数学理论很复杂，用了几十年时间才发展出相应的技术，尤其是测定夸克之间强相互作用的技术。工作繁难，包括建立最复杂的并行计算机，可以同时运行上万个处理器，以便计算质子和中子的特性。我们实际上测量的粒子就是这些。

在所有这些工作完成后，我们对质子的内部结构有了充分的了解。质子包括 3 个夸克，大概还有许多其他成分。尤其是，虚拟粒子反映粒子物理学。夸克一直来来往往，粒子物理学总结夸克之间的强相互作用。这是真实进程的瞬间快照。当然，这不是真正的照片，而是夸克粒子物理数学动力学的修饰。奇特和殊异的形状反映质子内夸克和场域相互作用的力量，同时虚拟粒子自发地生生灭灭。



质子断断续续地充满了这些虚拟粒子。事实上，我们估计虚拟粒子在质子总质量中所占的分量时，发现夸克本身所占分量甚微，大部分能量源于粒子场。质子的静能量，乃至静质量由此而来。中子情况相同。既然你由质子和中子组成，你也一样！

现在，我们既然能计算质子内外真空的虚拟粒子，为什么不能计算虚拟粒子对真空的影响呢？

哎，其实这种计算更困难。原因在于：我们计算虚拟粒子对原子或质子质量的影响时，实际上已经把虚拟粒子的能量包括在原子或质子总能量内了。然后，我们计算没有原子或质子时（真空）虚拟粒子的总能量。然后，我们将这两个数目相减，以便计算原子或质子受到的交叉影响。这样做的原因在于：我们着手解适当方程式时，这两种能量形式上无穷大。不过，我们将这两项相减，结果不同。而且，有一种结果跟测量值完全相等！

不过，如果计算虚拟粒子对真空的影响，我们没有什么可减，答案无穷大。

无论如何，无穷大不是一个好数值。在涉及物理学的问题上，我们总是尽可能避免。真空能量（或其他物质）不可能无穷大。因此，

我们必须寻找一种计算方法，得出有限答案。

无穷大的来源不难描述。我们考虑所有可能的虚拟粒子时，海森堡测不准定理（我要提醒读者，测量系统能量的不确定性与观测时间长度成反比。）暗示：粒子可以无中生有，只要它们在短时期内消失。从理论上讲，粒子可以携带几乎无穷大的能量，只要它们在几乎无限短时期内消失。

不过，我们理解的物理定律只能用于超过一定值的时间与距离。这个值对应于理解重力（还有时空效应）时必须考虑量子力学的尺度。在我们掌握了所谓的“量子重力”理论以前，还不能信任外推法，以逾越这些限度。

由此，我们可能希望：与量子重力有关的新物理学会以某种方式排除虚拟粒子，这些虚拟粒子存在于比所谓“普朗克时间”更短促的时间内。如果我们随即认定：虚拟粒子的累积效应等于或低于这种临时边界，那么，虚拟粒子为真空增加的能量就是一个有限值。

不过，这里有个问题。事实证明：这个估计值超过包括暗物质在内的所有已知宇宙物质 10^{120} 倍！

如果说：包括虚拟粒子的原子能级间距水平是物理学计算的最佳范例，那么，这个空间能量计算就是最差范例——超过宇宙万物总能量 120 个数量级。如果真空能量接近于这个庞然大数，由此产生的斥力（别忘了真空能量对应宇宙常数）就不够大，产生不了今天的地球。我们的宇宙就会在大爆炸最初片刻迅速四分五裂，不会形成任何结构、恒星、行星、人类。

我们称之为宇宙的常数问题，恰到好处。大约 1967 年，我读研究生以前，俄罗斯宇宙学家雅科夫·泽尔多维茨（Yakov Zel’dovich）第一次阐明了这个问题。宇宙常数问题今天仍然悬而未决，或许是当代物理学最大的未解之谜。

这个问题 40 年未能解决，但我们的理论物理学家知道应该怎样解决。我像 4 岁孩子一样，猜测真空能量应该为 0。我们还觉得：

最终理论产生时，可以取消虚拟粒子效应，让真空能量正好等于 0。或者不如说：等于无。

我们有更好的理由。或者说，我们自以为有更好的理由。我们必须减少巨大的真空能量值，以便协调观测值上限。因此，我们需要巨大的负值抵消巨大的正值，消除 120 个数量级，不能留下 121 个 0！可是，这两个大数值非常精确，仅有少量尾数，予以取消，在科学上没有前例。

不过，0 这个数字很容易产生。大自然经常表现对称性，不同部分的计算经常相反相等，精确抵消。或者说，结果还是等于无。

这样，我们理论家晚上才能轻松入睡。我们不知道如何实现最后结果，但我们确信最后结果只能是这样。

不过，大自然另有高见。

第五章　逃逸宇宙

只考虑目前生命的起源，没有什么意义。何妨考虑宇宙的起源。

——查尔斯·达尔文（Charles Darwin），1863

1995 年，我和迈克尔·特纳的论断仍然是异端邪说。我们设想宇宙是平坦的，依据不外乎理论偏见。（我应当再次强调：三维宇宙的“平坦”，意义不同于二维煎饼的平坦，而是说：在我们直观感受到的三维宇宙中，光线直线前进。弯曲的三维空间相应地更难描述，光线沿着空间曲率前进，不呈直线。）我们那时推断：只要总能量的 30% 以暗物质形式存在，围绕星系和星系群，所有宇宙参数都会符合平坦宇宙。不过，更奇怪的是：宇宙其余 70% 能量不以任何物质形态存在，而是存在于真空自身。

以任何标准判断，我们的理念都堪称疯狂。为了让宇宙常数符合我们的要求，上一章所说 120 个数量级的估计值必须减少，但仍然不完全等于零。微调大自然已知的物理量，所关匪细。我们完全不明白怎样调节。

我在许多大学做过平坦宇宙的讲演，主要的收获就是微笑、没有别的，这就是原因之一。我想：许多人并没有认真对待我的建议，甚至我和特纳都没有认真对待。我们的目的在于，用图示阐明我们和全世界同行理论家面对的事实：当时的“标准”宇宙图景存在某些错误。根据广义相对论推算：今天平坦宇宙赖以产生的大部分能量源于暗物质，只有一点点重子物质（包括我们地球生命、星体、

可见星系）掺杂其中，就像撒了一点盐。

一位同事最近提醒我：我们的小论文提出已经2年，引用者寥寥无几，显然只有我和特纳的一两篇论文。我们的宇宙虽然复杂难解，学术界仍然不相信我和特纳的疯狂建议。

为了解决矛盾，最简单的替代方法就是：宇宙并不是平坦的，而是开放的（平行光线轨迹在回溯中分离）。当然，早在测量宇宙微波背景辐射以前，这种选择就已经行不通了。不过，即使这种可能性有自己的问题，情况仍然远远没有澄清。

高中物理学生都能说清重力，也就是万有引力。当然，像许多科学问题一样，我们现在承认：大自然的想象力超过了我们的预期。如果我们现在设想：宇宙膨胀由于万有引力而放慢，就可以估计特定距离的星系从大爆炸以后逃逸的常速，从而确定宇宙年龄的上限。这是因为：如果宇宙早已减速，以前的星系逃逸速度一定会更快。因此，宇宙演化到目前的状况，需要的时间少于根据目前速度的预期。在物质主导的开放宇宙中，宇宙减速会比平坦宇宙更慢，因此，在同样的膨胀速度下，其推定年龄大于物质主导的平坦宇宙。其实，这样会更接近宇宙始终匀速膨胀的估计值。

不要忘记：真空能量不等于零，就会产生类似万有斥力的宇宙常数。这样就暗示，宇宙膨胀一直在加速。因此，星系分离的速度曾经比现在更慢。这样就暗示，宇宙演化到目前的状况，需要的时间多于匀速膨胀。确实，今天哈勃常数已经确定。如果我们将宇宙常数和明暗物质都包括在内，自由调整今天宇宙物质密度，宇宙可能寿命最长为200亿年。

1996年，一个团队——我、查博耶（Chaboyer）、耶鲁大学（Yale University）同事皮埃尔·德马可（Pierre Demarque）、凯斯西部保留地大学（Case Western Reserve University）的彼得·柯南（Peter Kernan）——将宇宙星体的年龄下限降为120亿年。我们用高速计算机模拟数百万不同星体演化，跟银河系星团的真实星

体比较颜色、亮度。长期以来，人们认为银河系是星系中最古老的物体。估计银河系形成大约需要 10 亿年，这个下限排除了物质主导的平坦宇宙，有利于宇宙常数（这个因素让我和特纳以前的论文大费周章）。这时，开放宇宙命悬一线。

不过，推断最古老星体的年龄，有赖于当前的观测灵敏度。1997 年，观测数据更新，迫使我们将星体年龄估计值降低大约 2 亿年，让宇宙更年轻。于是，情况更加模糊不清。3 种宇宙论都卷土重来，我们只能从头开始。

1998 年，一切都变了。恰好就在这一年，“飞去来”号证明宇宙是平坦的。

埃德温·哈勃测量宇宙膨胀速度以来的 70 年来，天文学家测量其数值，越来越精确。早在 1990 年代，他们就发现了“标准烛光”：就是观察者可以独立确定的内禀光度。于是，他们测定星体外表光度，由此推算距离。标准烛光似乎可以信赖，用于观测时空深处。

1a 型超新星是一种爆炸的星体，最近测定了亮度和长度。测定 1a 型超新星维持必须亮度的时间，第一次考虑了宇宙膨胀引起的时间膨胀。这就暗示超新星的生命周期比静态框架的真实周期长。我们推算超新星的绝对亮度，用望远镜测量其外观亮度，最后判断爆炸所在星系的距离。我们测量星系红移，就能同时确定其距离。我们将二者综合起来，就能更精确地测定宇宙膨胀速度。

超新星极其明亮，因此不仅提供了测量哈勃常数的良好工具，还能回溯宇宙总寿命的重要部分。

由此产生了令人兴奋的新可能性：测量哈勃常数在整个宇宙演化期间的变化。

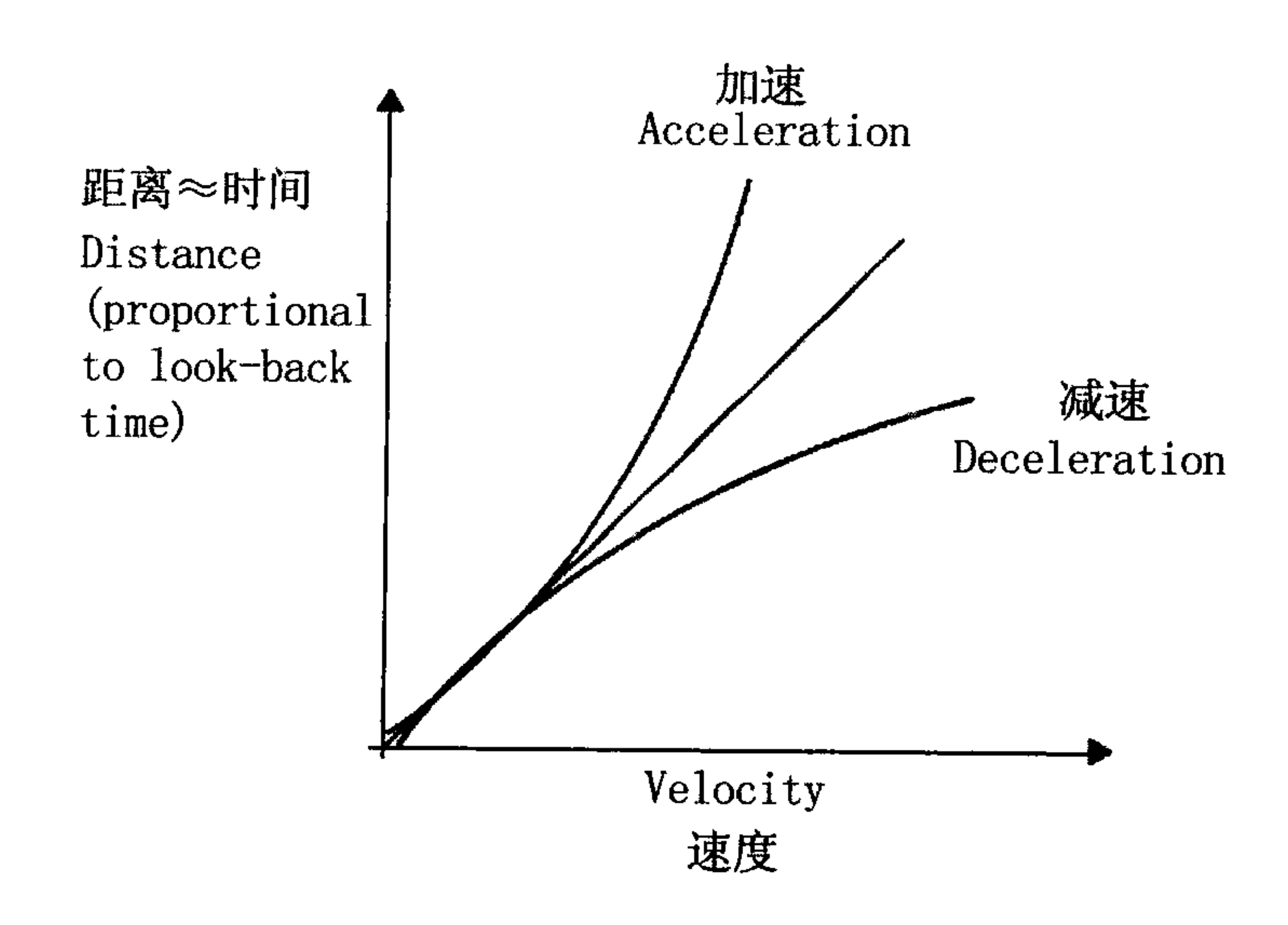
测量常数的变化，要不是由于人类生命在宇宙时间尺度上极其短促，听起来就像自相矛盾。在人类的时间尺度上，宇宙膨胀速度确实是常数。然而，如前所述：由于重力的影响，在宇宙时间尺度上，宇宙膨胀速度会改变。

天文学家推断：如果他们能测量（可见宇宙）远方超新星的速度和距离，就能测量到宇宙膨胀速度放慢。（因为重力主导宇宙，人人以为宇宙膨胀会放慢！）然后，他们希望显示宇宙是平坦、开放还是闭合，因为每一种宇宙几何形态的时间函数不同，会影响膨胀放慢的速度。

1996年，我用了6个星期访问劳伦斯·伯克利实验室（Lawrence Berkeley Laboratory），举行宇宙学讲座，跟同事讨论众多科学项目。我谈到我们提出的学说：真空可能有能量。后来，年轻物理学家索尔·普密特（Saul Perlmutter）探测远方的超新星，跑来对我说："我们会证明你错了！"

索尔质疑的对象是：在我们的理论中，平坦宇宙百分之七十的能量蕴含在真空中。这种能量就会产生宇宙常数，于是万有斥力弥漫整个空间，主导宇宙膨胀。取消这种能量，就会导致宇宙膨胀加速，而不是减速。

如前所述：如果宇宙膨胀始终加速，宇宙年龄估计值就应该提高；如果减速则相反。而后，这将暗示：红移星系的时间回溯应该更久；如果减速则更短。继而：如果逃逸时间更久，光源就应该



更远；如果减速则更近。从理论上讲：我们测量速度和距离的比值，根据星系相对近处的曲率，就可以确定今天的膨胀速度。然后，远方超新星的曲率无论向上还是向下，都会证明宇宙在其全程中是加速还是减速。

这次会见两年后，索尔及其同事的国际研究团队“超新星宇宙项目”（Supernova Cosmology project）根据早期原始数据发表了一篇论文。论文提示：我们确实错了。（其实他们并没有真正论证我和特纳的错误，因为他们和大多数其他实验者一样，没有认真对待我们的理论。）他们的数据提示：距离－红移指数向下弯曲。由此可见：真空能量上限必须极低，才能保证大量增加今天的总能量。

不过，一如既往，早期数据不代表所有数据。你的统计可能运气不好，或是有意想不到的系统错误，从而影响结果。你必须有更大的样本，才能说明问题。“超新星宇宙项目”发表的数据证明结论有误。

另一个国际超新星研究项目名叫“高红移超新星搜索组”（High-Z Supernova Search Team），由布里安·施密特（Brian Schmidt）领导，在澳大利亚圣特洛莫洛峰天文台（Mt.Stromlo Observatory）完成了一个目的相同的项目，结果不一样。布里安最近告诉我：“高红移超新星搜索”取得第一个重要结果，提示宇宙加速膨胀、真空能量重要。这时，一家期刊告诉他们：他们一定弄错了，因为“超新星宇宙项目”已经断定宇宙确实是平坦的，主要是物质。

两个团体斗争的细节无疑会多次重演，尤其是他们共享了诺贝尔奖以后，一定会发生。这里不讨论优先权。只说一点：1998 年初，施密特团体发表论文，证明宇宙加速膨胀。大约 6 个月以后，普密特团队公布了类似结果。他们发表的论文证实了“高红移超新星搜索组”的结论，实际上承认自己以前的错误——结果支持真空能量

主导宇宙。真空能量通常称为暗能量。

虽然这意味着大规模修正宇宙图景，学术界还是迅速接受了这些结论，堪称科学社会学的有趣范例。虽然卡尔·萨根（Carl Sagan）强调“不寻常的假说需要不寻常的证据”，但学术界几乎在一夜之间，普遍接受了这个结论。如果有不寻常的假说，这肯定就是。

1998 年 12 月，《科学》杂志称宇宙加速膨胀为年度科学突破，封面图案不同寻常，是吃惊的爱因斯坦。我颇为震惊。



《科学》杂志封面。封面文章内容为：宇宙加速：年度科学突破

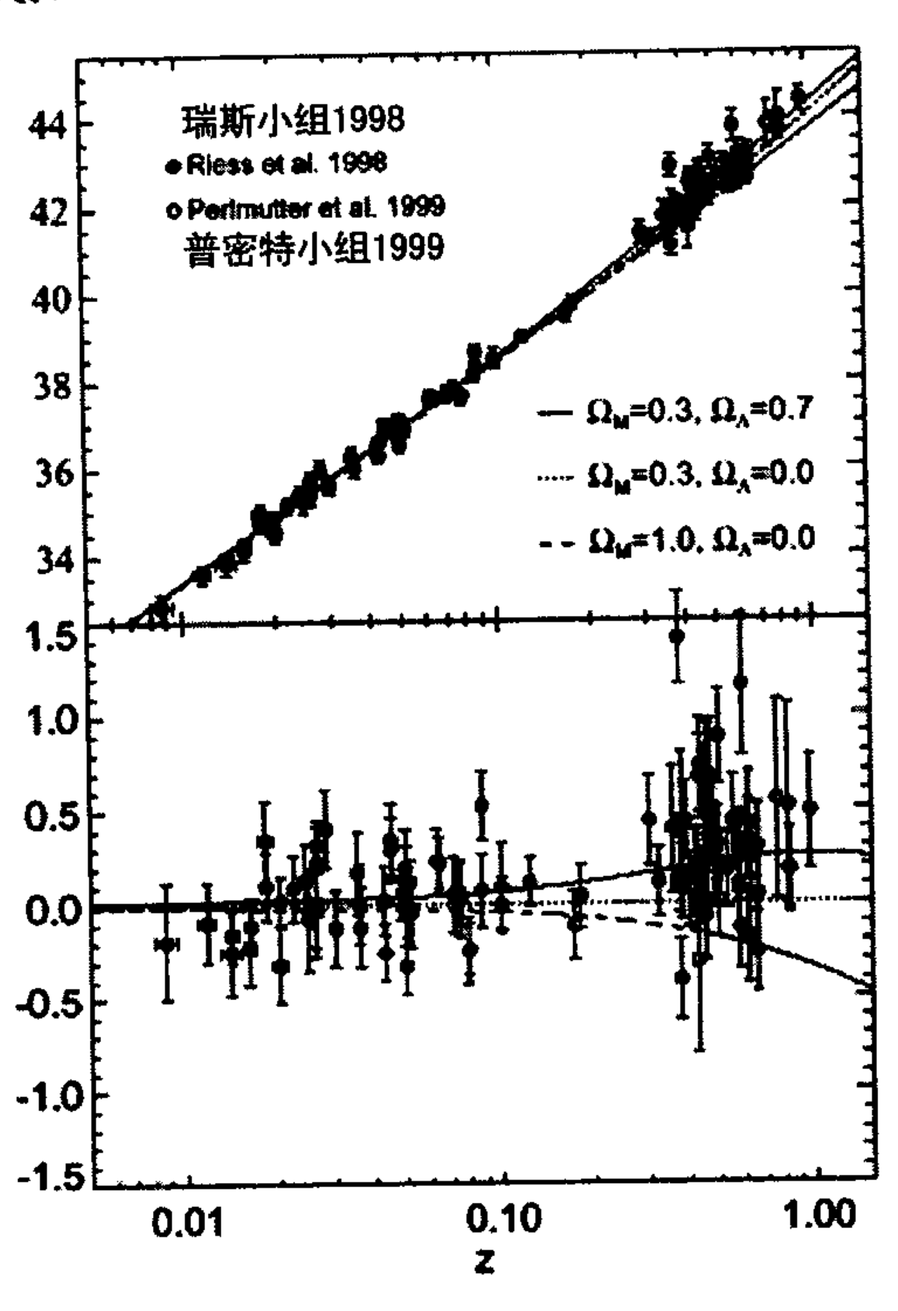
我吃惊，不是因为我认为结论配不上这样的封面。恰恰相反。只要结论可靠，这就是当代最重要的天文学发现。但当时的数据只能提供强有力的暗示。他们要求完全改变宇宙图景。我觉得，更可靠的做法是：在所有人都去赶宇宙常数的时髦之前，研究小组应该首先通过观测，排除其他可能的原因。当时我至少对一个记者说过：“我第一次不相信宇宙常数，就是在观察者宣称发现宇宙常数的时

候。”

我这个说法多多少少是调侃。我花了一二十年时间鼓吹这种可能性，现在这么说就显得很奇怪。我身为理论家，觉得这个推测不错，尤其是因为它打开了新的实验途径。不过，我相信：检查真实数据时，要尽可能保守。原因或许是：我在自己的粒子物理学领域，已经见惯令人兴奋的实验性新假说灰飞烟灭。到了科学成熟期，各种发现包括：大自然的第五种力；新元素粒子；我们的宇宙整体旋转，像投环一样来来往往。

当时宇宙加速最大的相关问题是：遥远的超新星可能比原先设想的更微弱。原因不是加速膨胀，而仅仅是：1. 超新星本来就更微弱。2. 早期星系中或星系间的尘埃遮蔽。

此后的 10 年间，加速膨胀的证据压倒了一切。首先，更多的高红移超新星受到测量。由此，两个小组在一年内联合研究原始资料，形成了以下计划：



为了引导读者察看距离－红移曲线向上或向下弯曲，观测人员在图表上半部分划出一条直线：从左下方到右上方，联接代表附近超新星的数据。这条线的斜率代表今天宇宙的膨胀速度。然后，观测人员在图表下半部分划出同样一条直线，引导读者察看。如果宇宙膨胀像1998年预测的那样减速，遥远的超新星红移就会接近于1，落到线下。但如你所见，它们大部分都在线上。原因可能如下：

1. 数据错误。
2. 宇宙膨胀加速。

我们现在如果选择第二种解释，询问："有多少能量才能产生观测到的加速膨胀？"答案值得注意。最贴近数据的立体曲线对应平坦宇宙，百分之三十的能量存在于物质，百分之七十的能量存在于真空。值得注意：这个答案恰好吻合平坦宇宙的事实，只有百分之三十的必须质量存在于星系内和星系周围。我们已经获得了明显协调的一致。

不过，这种不寻常的假说要求百分之九十九的宇宙物质不可见，因此，我们应该认真考虑上面提到的第一种可能性……也就是说：数据错误。在这10年当中，所有其他的宇宙学数据始终符合繁琐的平坦宇宙图景：大部分能量蕴含在真空内，可见部分不到总能量的百分之一，其余部分由某些未知的新型基本粒子组成。

首先，新卫星提供了衰老恒星元素丰度的信息，恒星演化的新数据已经有所改进。2005年，我和同事查博耶运用这些数据，最终确定了宇宙年龄的估计值，足以排除小于110亿年的寿命值。只有真空蕴含能量的宇宙才能与之协调。又一次，由于宇宙常数，我们不能确定这种能量。现在，这种能量通常称为"暗能量"，对应主导星系的"暗物质"名号。

大约2006年，威尔金森微波各向异性探测器（WMAP）精确测定

宇宙微波背景辐射，推算银河系年代的工作大有进展，允许观测人员精确计算大爆炸。我们现在获得了直到第 4 位数字的宇宙年龄：137.2 亿年。

我以前从未想到，在自己有生之年能获得如此精确的数值。但现在我们有了精确值，就可以肯定：如果没有暗能量，以目前速度扩张的宇宙不可能有这么大年龄。事实上，暗能量像宇宙常数一样必不可少。换句话说，其能量始终恒定。

在下一次科学突破中，观测人员能够精确测量：物质如何在整个宇宙聚集起来，形成星系。结果取决于宇宙扩张速度，一方面引力将各星系拉近，另一方面宇宙膨胀驱使物质分离。真空能量越大，主导宇宙能量越快，宇宙膨胀加速越早，将会减慢、最终停止更大尺度的物质重力塌缩。

因此，观测人员测量重力聚集，再一次确定：只有平坦宇宙才符合观测所得的大尺度结构——宇宙有百分之七十的暗能量。又一次，暗能量多多少少类似宇宙常数。

超新星观测人员用这些方法间接测量宇宙膨胀史，全面检测可能影响分析的系统错误，包括远距离宇宙尘埃增加、降低超新星亮度的可能性，把这些因素一一排除。他们最重要的一项实验涉及回溯时间。

宇宙越接近早期，目前可见区域的尺度越小，物质密度就越高。不过，真空能量密度如果源于宇宙常数或诸如此类的东西，仍然保持不变。于是，宇宙尺度不到目前一半时，物质能量密度就已经超过了真空能量密度。物质重力压倒宇宙膨胀，膨胀就会减速。

经典力学称系统从减速到加速的一刻为“转折点”。2003 年，我在大学组织宇宙学未来研讨会。“高红移超新星搜索组”成员亚当•瑞斯（Adam Reiss）应邀出席，告诉我：他要发布令人兴奋的消息。他说到做到。第二天，《纽约时报》（*New York Times*）报道会议，瑞斯的照片和头版文章《发现宇宙转折点》（*Cosmic Jerk*

Discovered）一起登出。我保留了这张照片，偶尔用来消遣。

宇宙膨胀史的细节图景研究证明：从减速到加速的变化给最初的观测增加了很大分量。这些观测提示：事实上，暗能量是正确的。根据细节图景研究和目前获得的其他证据，很难想象我们的宇宙探索都是一场空。无论喜欢不喜欢，暗能量已经站稳了脚跟。至少，在发生某些变化以前，仍然站得住脚。

暗能量的起源和性质无疑是今天基础物理学最大的未解之谜。我们完全不明白：暗能量怎样起源、怎样取得目前的数值。因此，我们不知道：为什么暗能量在相对晚近的时代（5万年前左右）才开始主导宇宙膨胀，是不是纯属偶然事件。人们自然会猜想：暗能量性质跟宇宙起源有某些根本性联系。我们预期：宇宙的未来取决于此。

第六章　宇宙尽头的免费午餐

太空浩瀚，确实浩瀚。你简直难以想象其浩瀚，可谓惊心动魄。我的意思是：你可以想象一条长路通向药店，但这只是太空一粟。

——道格拉斯·亚当斯（Douglas Adams），
《搭便车漫游银河系指南》
（*A Hitchhikers Guide to the Galaxy*）

我想，二选一不坏。我们宇宙学家早已猜测到平坦的宇宙，事实证明猜测无误。因此，真空确实有能量，我们并不感到惊讶。事实上，真空能量足以支配宇宙膨胀。仅仅存在这种能量就难以置信，而宇宙没有因此而无法居住，甚至更不可思议。如果真空能量跟我以前提到的估计一样大，膨胀速度就会非常大，我们现在看到的宇宙万物会迅速飞出视野。早在恒星、太阳、地球形成之前，宇宙就会变得寒冷、空旷、黑暗。

在设想宇宙平坦的所有理由中，最简洁易懂的一条就是：宇宙近乎平坦，一目了然。早在暗物质发现以前，星系内外已知物质大约只占平坦宇宙所需物质总量的百分之一。

百分之一似乎寥寥无几，但宇宙非常古老，年代数以亿计。假如物质或辐射的重力效果主导宇宙的膨胀演化——我们物理学家一般都这样看——那么，只要宇宙不完全平坦，就会随着膨胀变得越来越不平坦。

如果宇宙开放，膨胀速度比平坦宇宙更快。各部分离散，越来

越远，大大超过非开放宇宙。结构密度减少，迅速趋于平坦宇宙所需的无限小密度。

如果宇宙闭合，那么膨胀速度会更快地减慢，最后导致再塌缩。密度降低的速度一开始比平坦宇宙更慢，然后随着宇宙塌缩，密度重新升高。闭合宇宙和平坦宇宙密度的差异同样随着时间而增加。

宇宙从第2秒开始，增长速度数以万亿计。如果在较早的时候，宇宙密度并不是接近平坦，即使当时相对于平坦宇宙，仅仅有10个因子的误差，那么今天的宇宙相对于平坦宇宙，就会有10亿因子的误差，而不是只有100个因子的误差。（只计入可见物质，不考虑暗物质和暗能量。）

甚至早在1970年代，这个所谓的“宇宙平坦”问题就已经众所周知。宇宙的几何性质就像一支铅笔垂直立在桌面上。只要有最轻微的扰动，就会失去平衡，迅速倒下。平坦宇宙就是这样。只要有最轻微的偏离，就会迅速放大。因此，如果当时的宇宙并不完全平坦，今天的宇宙怎么可能近乎平坦呢？

答案很简单：今天的宇宙一定得平坦！

答案其实并不这么简单，因为它引起了下一个问题：初始条件怎样才能产生一个平坦的宇宙呢？

第二个问题难度更大，有两个答案。第一个答案要回溯到1981年。当时，年轻的理论物理学家艾伦·古斯在斯坦福大学（Stanford University）做博士后研究，思考宇宙平坦性问题和另外两个跟宇宙大爆炸标准图景有关的问题：所谓的地平问题和磁单极子问题。我们这里只关注前者，因为磁单极子问题只会使宇宙平坦性问题和地平线问题更加复杂化。

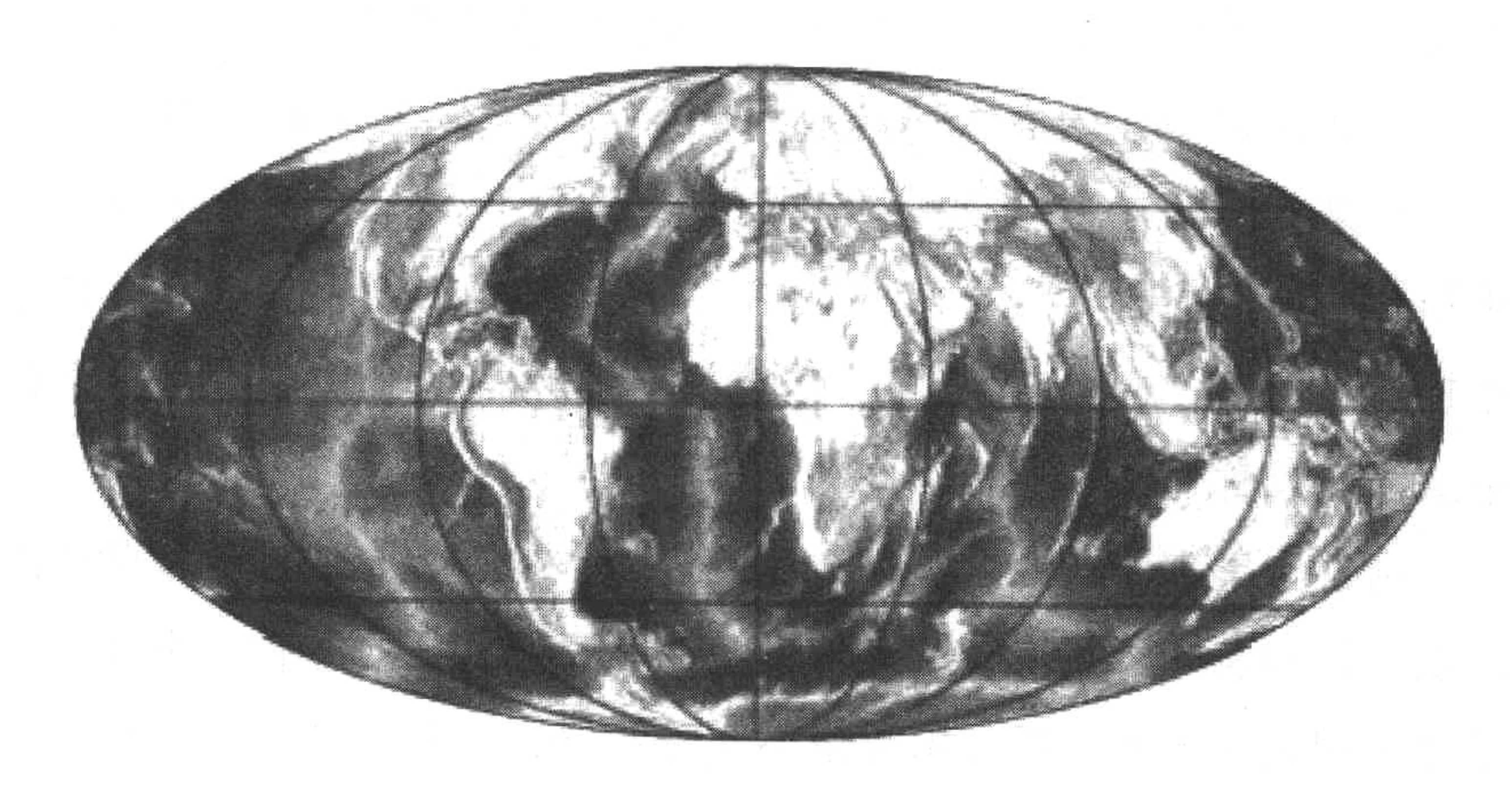
地平问题的相关事实是：宇宙微波背景辐射极其均匀。我以前描述的细微温度偏差代表物质和辐射密度的变化，可以追溯到刚刚诞生几十万年的宇宙。跟密度和温度完全相等的状况相比，偏差不超过万分之一。因此，我集中关注细微偏差时，一个更深刻、更紧

急的问题出现了：宇宙怎么会一开始就如此平坦？

毕竟，如果宇宙早期微波背景辐射温度偏离十万分之一，我前面显示的图像颜色就会大相径庭。我用直线标度显示天空微波标度图，图线的变化反映温度的变化。变化在背景辐射 ±0.03 度范围内，背景辐射大约在绝对零度 2.72 度左右，仅仅偏离平均值百分之一。标度图如下：



图中没有可以辨识的结构，很像地球表面的投影，只是敏感性稍大一些，以色彩变化表示。平均半径大约五百分之一。



因此，宇宙在大尺度上平坦到不可思议的程度！

怎么可能会这样？好吧，可以这样简单地设想：早期宇宙灼热、稠密，处于热平衡状态。这意味着：任何热点都会冷却、任何冷点

都会变热，最后，原始基质完全温度相等。

不过，如前所述：宇宙刚刚几十万年时，光线可能只走了几十万光年，代表目前可见宇宙整体的一小部分。（以前的距离只代表图中一度，图上是今天观测到的宇宙微波背景辐射最近散射表面。）爱因斯坦告诉我们，没有任何信息比光更快。因此，在标准大爆炸图中，只要超过 1 度，目前可观测宇宙各部分的存在与温度就不可能相互影响。因此，在这样的大尺度下，气体无法及时交换热量，达到同样的温度！

粒子物理学家古斯思考可能与此相关的早期宇宙进程，产生了一个天才的认识。如果宇宙冷却时经历一次相位转换，就像水冻成冰、铁条冷却时磁化，不仅能解决地平问题，还能解决宇宙平坦性问题（以及磁单极子问题）。

如果你喜欢喝真正的冰啤，就会有这样的经验。你从冰箱里取冰啤酒瓶，一打开就释放了里面的压力，啤酒突然完全冻结，甚至会弄破一部分瓶子。原因在于：在高压状态下，啤酒的最低能量级是液态；压力释放时，最低能量级是固态。相位转换期间可能会释放能量，不同相位的最低能级不同。这样释放的能量称为“潜热”。

古斯意识到：随着大爆炸以后的宇宙膨胀，物质和辐射的结构可能在某些稳定状态固定一段时间。直到最后，随着宇宙冷却，物质和辐射结构突然经历了相位转换。相位转换完成以前，能量储存在宇宙结构的“伪真空”中，可以戏剧性地影响宇宙膨胀。如果你乐意，可以称之为“宇宙潜热”。

伪真空能量很像宇宙常数，因为其影响类似弥漫于全部真空的能量。这将会导致宇宙膨胀越来越快。最后，可观测宇宙的前身膨胀速度超过了光速。狭义相对论不允许超光速，但广义相对论允许。但我们应该像律师一样咬文嚼字。狭义相对论说：没有任何东西能够超光速通过空间。但空间本身想怎样就怎样，至少在广义相对论中是这样。空间膨胀时，可以携带空间内的遥远物体分离。

事实证明：如果宇宙膨胀因数超过1028，膨胀前的整个可观测宇宙就可以容纳在更小的区域里。这个因数大得不可思议，却发生在1秒钟的极小一部分当中。如果没有暴涨，这个区域就会大得多。区域小，因此有充分的时间交换热量，达到同样的温度。这一点最重要。

暴涨产生了另一个相当普遍的预测。气球越吹越大时，气球表面的曲率就会越来越小。暴涨期间，宇宙尺度在宇宙常数或伪真空能量驱使下以指数增长，情况与此类似。其实，暴涨（解决了地平问题）结束后，宇宙曲率（如果一开始不是零）已经小到微不足道。甚至在今天的精确测量下，宇宙仍然极其平坦。

目前，暴涨是宇宙同质性和平坦性唯一可行的解释，其依据是基本、可靠的围观粒子理论。但除此之外，暴涨还产生了另一个或许更重要的预测。如前所述，量子力学定理暗示：真空可以在极小尺度、极短时间内产生虚拟粒子和虚拟场，像沸腾的泡沫一样生生灭灭。这种“量子波动”可能对质子和原子的特性起到重要作用，但在更大尺度上不可见。我们对此感到极不自然，这是原因之一。

不过，在暴涨期间，这些量子波动决定各空间区域结束指数型膨胀的时间。不同区域停止暴涨的时间（在显微尺度上）略有不同。伪真空能量释放时，不同区域产生的物质和辐射密度彼此不同，因为它们的热能略有不同。

事实证明：暴涨后的密度起伏精确地吻合宇宙大尺度微波辐射的热点和冷点。我应该强调：如果没有量子波动，宇宙就是真空。当然，吻合不是证据。但在宇宙学家当中日益增长的看法是：如果它走起来像鸭子、看起来像鸭子、叫起来像鸭子，那它很可能就是鸭子。如果物质和辐射起伏不大的原因确实在于暴涨，后来导致物质塌缩成星系、星体、行星和人类，那么，我们今天的一切都是量子波动的结果，量子波动必然是无中生有的结果。

这一点非常重要，因此我想再次强调。量子波动本来完全看不见，

在暴涨中冻结，后来以能量波动形式出现，产生了我们今天看到的万物！如前所述，我们都是星尘的产物，同样，我们都是量子波动无中生有的产物。

这样明目昭著地违反直觉，近乎魔术。暴涨的把戏有一个方面特别烦人：初始能量从何而来？显微尺度的小区域怎么会变成今天这种尺度的宇宙，其中的物质和能量足以产生我们今天所见的万物？

更普遍的问题是：膨胀的宇宙怎么会保持能量密度、宇宙常数、伪真空能的恒定？毕竟，在这样一个宇宙中，空间呈指数膨胀。因此，如果能量密度不变，各区域的能量会随着区域的膨胀而增加。能量为什么保持恒定？

这是古斯所谓终极“免费午餐”的一个实例。考虑到包括重力在内的所有影响，宇宙物体可以奇妙地存在正负两种能量。重力这方面产生正能量，像物质和辐射。负能量结构的补充平衡了正能量内容的产生。这样，重力作用可以始于空旷的宇宙，结束于充满物质的宇宙。

这话听起来很可疑，但核心问题在于：我们许多人对平坦宇宙非常着迷。你从高中物理学就可以看出来。

把球扔向天空，通常就会落回地面。更用力扔（假设你不在室内），球就会飞得更高、时间更久。最后，如果你足够使劲，球就再也不会回来。它逃出了地心引力场，向宇宙飞去。

我们怎样弄清球会什么时候逃逸？根据简单的能量会计学计算，地球重力场内的移动物体有两种能量。一种是动能，源于希腊语“运动”。动能永远是正值，取决于物体的运动速度。另一种能量是势能（有关做功的潜力），通常是负值。

在这个问题上，合理的方法似乎是：如果所有物体相互距离无

限远，总重力能就接近于零。动能肯定为零。我们将势能定义为零，以便让总重力能为零。

如果某个物体跟所有其他物体的距离不是无穷大，而是接近一个物体，例如地球，就会受到重力吸引而落下去。一面下落，一面加速。如果一路上砸到某些东西，例如你的头，就会产生效果，例如砸裂开来。物体离地球表面越近，击中地球的做功就越少。因此，越接近地球，势能就越小。但如果距离地球无限远，势能为零，那么，越接近地球，势能越小，负值就会越大。

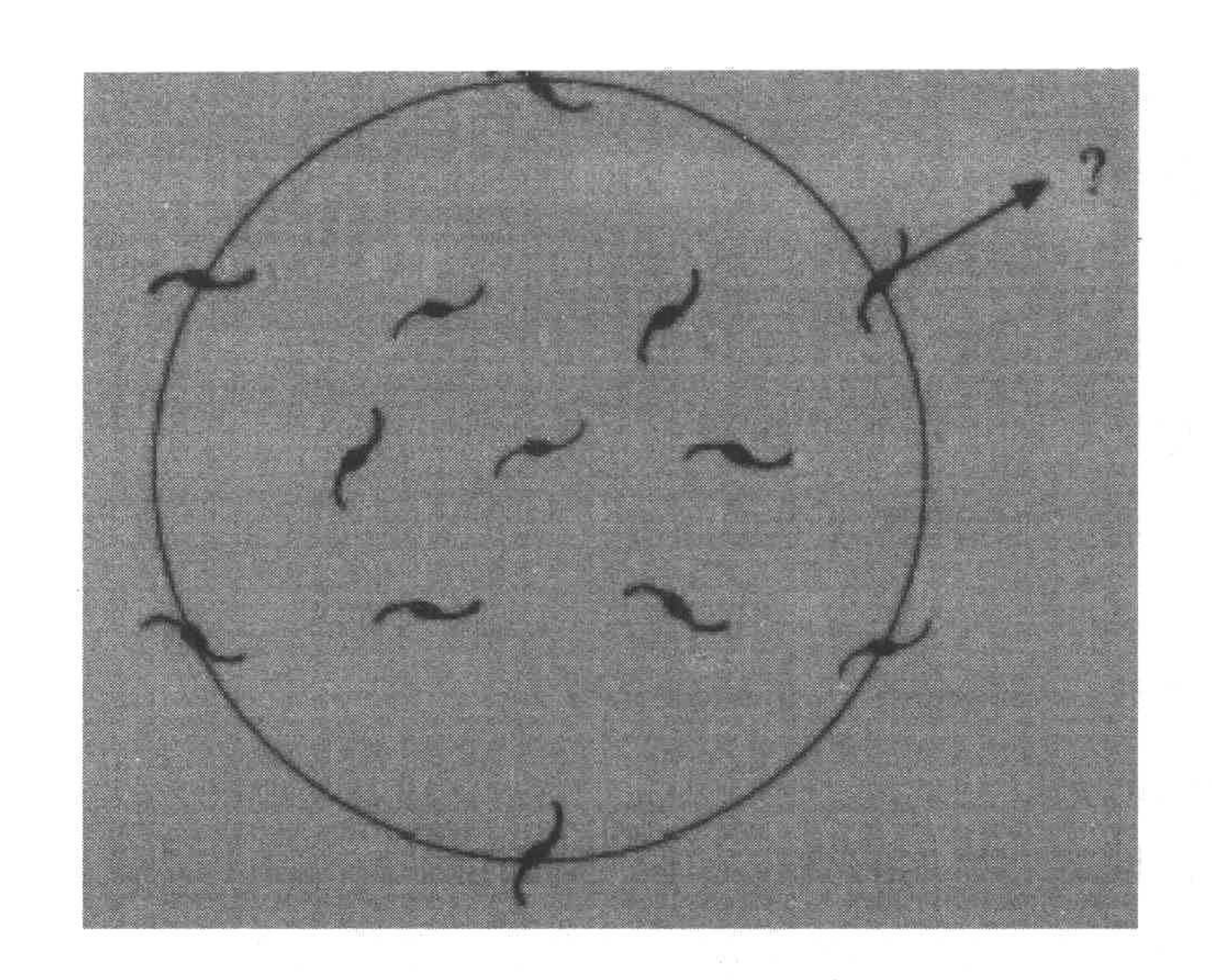
我前面说过：在经典力学中，势能的数值是武断规定的。我可以规定：地球上物体的势能为零，无限远处物体的势能就是一个大数字。将无限远处物体的势能设定为零，有其物理意义，但至少在我们目前讨论的问题上，仅仅是惯例而已。

无论势能的零点设定在哪里，只要物体只受到重力的影响，动能和势能的总数就是恒定值。随着物体下落，势能就会转化为动能。随着物体从地面上弹回，动能就会重新转化为势能。以此类推。

这就给我们提供了一个了不起的计算工具，可以推断多大的速度才能使抛出的物体逃离地球，因为物体最终会达到无限远距离外，总能量必须大于或等于零。然后，我们只需要确定物体抛出时的总重力能，也就是速度。地球表面的引力产生了负势能，正动能和负势能的平衡点就是神奇的逃逸速度。球的动能和势能同样完全取决于质量。因此，在两种能量相互抵消的地方，就能发现所有物体离开地球的“逃逸速度”。如果物体总重力能恰好为零，逃逸速度大概是每秒 5 英里。

你可能会问：所有这些跟通常所谓的宇宙，尤其是宇宙膨胀有什么关系？哎，我刚才描绘过从地面抛出球体的计算过程，膨胀宇宙中的万物同样如此。

以我们所在的位置（银河系）为中心，划出一个球体。其大小足以包括许多星系，但不超过我们今天最大的观测距离：



如果这个区域的大小恰到好处，星系逃逸的边缘就会与哈勃膨胀一致，但速度比光速小得多。这种情况下，牛顿定律可以适用。我们可以将广义相对论和狭义相对论的效应忽略不计。换句话说：万物适用于前述球体或飞船逃逸地球的同样物理定律。

星系如前所述，从分布中心逃逸。于是，我们要考虑星系能否逃离区域内其他星系的总重力约束，正如球体能否逃离地球。我们计算这个问题，答案跟计算球体逃逸同样精确。我们只须基于外向运动（赋予正能量）和星系相互吸引（赋予负能量），计算星系总重力能。如果总能量大于零，星系就会无限逃逸。如果总能量小于零，星系就会停止逃逸，转而塌缩。

值得注意的是：我们现在可以干脆重写星系总重力能的牛顿方程式，正好符合爱因斯坦广义相对论的宇宙膨胀方程式。广义相对论中对应总重力能的常数就是前述的宇宙曲率常数！

因此，我们的结论是什么？在平坦宇宙中，而且只有在平坦宇宙中，随着宇宙膨胀而移动的万物平均牛顿重力能恰好为零！

平坦宇宙的特殊之处就在于此。在这样的宇宙中，运动正能量和引力负能量相互抵消。

我们允许真空有能量，情况就变得更加复杂。简单的牛顿抛物定律不再适用，但结论相同。在平坦宇宙中，甚至在常数很小的宇宙中，只要尺度小、速度低于光速，宇宙万物的牛顿重力能就等于零。

事实上，考虑到真空能量，古斯的“免费午餐”就会更加戏剧化。随着宇宙所有区域尺度的膨胀，宇宙就会越来越接近平坦。因此，在膨胀转化为物质和能量期间，真空能产生的万物总牛顿重力能恰好等于零。

你可能还会问：宇宙自发膨胀时，在暴涨中保持能量密度的所有能量从何而来？这里就要靠广义相对论另一个非凡特征了。不仅物体的重力能量是负值，甚至相对“压力”也是负值。

负压甚至比负能量更难描绘。气球内的气体对气球壁施加压力。如果气球壁膨胀，气体就对气球壁做了功。做功导致气体损失能量而冷却。不过，事实证明：真空能量是排斥力，因为它产生真空“负压”。由于负压，宇宙膨胀确实对真空做功。甚至在宇宙膨胀时，做功仍然保持能量密度常数。

因此，如果宇宙极早期真空无限小区域具有物质和辐射的量子特性，这个小区域就注定膨胀到极大、极平。暴涨结束后，宇宙充满了物质和辐射。总重力能不出所料，接近于零。

于是，经过百年探索，尘埃落定。我们测量宇宙曲率，结果为零。不难理解：包括我在内的所有理论家不仅心满意足，而且觉得极具暗示性。

宇宙无中生有……确实如此。

第七章　我们悲惨的未来

未来不同于以往。

——尤吉·贝拉（Yogi Berra）

在某种意义上，发现我们处在无中生有的宇宙中，值得注意，令人兴奋。我们已经看到：星体和星系这样的结构都是量子波动无中生有的结果。如果你喜欢，就尽量享受这个想法吧。因为：如果这一切都是真的，至少就我们的未来而言，我们就生活在最糟糕的宇宙中。

不要忘记：爱因斯坦仅仅在一个世纪以前才发展出广义相对论。传统智慧认为：我们的宇宙平坦、永存。事实上，爱因斯坦不仅嘲笑勒梅特尔的大爆炸，还发明了宇宙常数，以便维持静态宇宙。

现在，100年过去了。我们科学家自信满满，因为发现了宇宙膨胀的基础——微波背景辐射、暗物质、暗能量。

但将来会怎样呢？

……诸如此类的诗歌早就说过。

膨胀不断加速，表面上的真空产生能量，这些能量主导宇宙。随着前一章结尾所说的暴涨，可观测宇宙濒临超光速膨胀的边缘。膨胀不断加速，因此情况日益恶化。

这就是说：我们等待的时间越长，能看到的东西就越少。未来有朝一日，我们现在看到的星系会超过光速，溢出我们的视界。它们发出的光线抵消不了宇宙膨胀的速度，永远到不了地球。它们将从我们的视野里消失。

这种方式可能有点不同于你的想象。星系并不是突然消失，不再在夜空中闪烁。相反，它们的退行速度接近光速时，红移就会不断增加。最后，所有可见光都变成红外线、微波和无线电波。就这样，它们发出的光波超出了可见宇宙范围，完全看不见了。

我们可以算出这个过程大概需要多长时间。银河系所在星系团在重力作用下聚集起来，不会在哈勃发现的宇宙背景膨胀中退散。我们到星系周围的距离，大约只有我们到光速退行处距离的 1/5000th。银河系需要 1500 亿年才能到达光速退行处，那里的红移因数超过 5000，这个时间相当于宇宙目前年龄的 10 倍。它们的光波需要经过 2 万亿年红移，波长才能达到可见宇宙的尺度。到那时，银河系以外的宇宙都将名副其实地消失。

2 万亿年貌似很长一段时间，确实也是。不过，在宇宙意义上，这离永恒还差得远。寿命最长的“主序”星（演化史与我们的太阳相同）远比太阳长寿，2 万亿年后仍然发光（我们的太阳在 50 亿年以后就会熄灭）。因此，在如此遥远的未来，这些恒星周围的行星有太阳能、水和有机物，可能会产生文明。这些行星的天文学家可能会用望远镜，但他们观察宇宙时，我们现在能看到的 4000 亿星系必定已经消失了！

我试图用这种论据说服国会资助宇宙学项目：如果现在不抓紧时间观测，以后就没有机会了！不过，国会议员觉得：2 年时间就已经很久，2 万亿年根本无法想象。

无论如何，这些遥远未来的天文学家如果知道他们错过了什么，肯定会大吃一惊。我几年前结识了范德比尔特大学（Vanderbilt University）的同行罗伯特·舍勒（Robert Scherrer）。我们发现：不仅宇宙其余部分已经消失了，大爆炸以后宇宙开始膨胀的所有证据和真空存在暗物质的所有证据也已经消失。后者本来可以解释消失的原因。

不到 100 年前，传统观点还认为宇宙既平坦又永恒，恒星和行

星生生灭灭。但即使在遥远的未来，我们的行星和文明早已灰飞烟灭，宇宙在最大尺度上仍然永生不灭。这种观点一直保持到 1930 年代，而且一次又一次卷土重来。

大爆炸的经验性证实有三大支柱。有了三大支柱，即使爱因斯坦和勒梅特尔从来没有出生，我们仍然不得不承认：宇宙始于高密度灼热状态。这三大支柱是：哈勃观测的宇宙膨胀；宇宙微波背景辐射的发现；轻元素丰度符合观测证据。轻元素包括氢、氦、锂。我们测得的轻元素数量符合宇宙最初几分钟的理论预测。

让我们从哈勃宇宙膨胀开始。我们怎么会知道宇宙在膨胀？我们根据远方天体的距离，推算其退行速度。不过，一旦银河系星系团以外的可见天体（通过重力联系）在我们的视界中消失，宇宙膨胀的迹象就随之消失。恒星、星系、类星体，甚至巨型气体云都看不见了。宇宙膨胀非常有力，所有逃逸的天体都从我们的视界中消失了。

而且，如果时间尺度不足 1 万亿年，银河系星系团的所有星系都会聚集成一些超星系。遥远未来的观察者多多少少能看到 1915 年的观察者自以为看到的东西：银河系独一无二，包含所有恒星和行星，周围是空旷、广漠、平坦的宇宙。

我们应该回顾：真空有能量的一切证据都源于宇宙膨胀加速，但膨胀还是无迹可寻，观测不到膨胀加速。确实，我们阴差阳错，生活在唯一能观测到暗能量弥漫真空的宇宙时期。虽然这个时期长达数千亿年，但在永恒膨胀的宇宙中，不过弹指一挥间。

如果我们假设真空能量像宇宙常数一样大致守恒，那么，在更早的时代，物质和辐射的能量密度远远超过真空能量密度。原因就在于：随着宇宙膨胀，粒子距离增加，物质和辐射密度随之减少。因此，各部分物质都大大减少。在更早的时代，50 亿到 100 亿年前，物质和辐射密度远远超过今天。那时和那时以前的宇宙主要由物质和辐射组成，它们产生的重力主导宇宙。在这种情况下，宇宙膨胀

在当时就已经放慢，无法观测重力对真空能量的影响。

出于同样的原因，在遥远的未来，宇宙年龄达到几千亿年时，物质和辐射密度甚至会进一步减少。可以算出：暗能量平均密度比宇宙全部残余物质和辐射的密度大 1 万亿倍。到那时，宇宙大尺度的重力动力学将会完全取决于暗物质。不过，在后面的年代，宇宙加速膨胀必然已经无法观测。在这种意义上，真空能量就其本性而言，只能在短时期内观测到。我们恰好就生活在这个不寻常的时期。

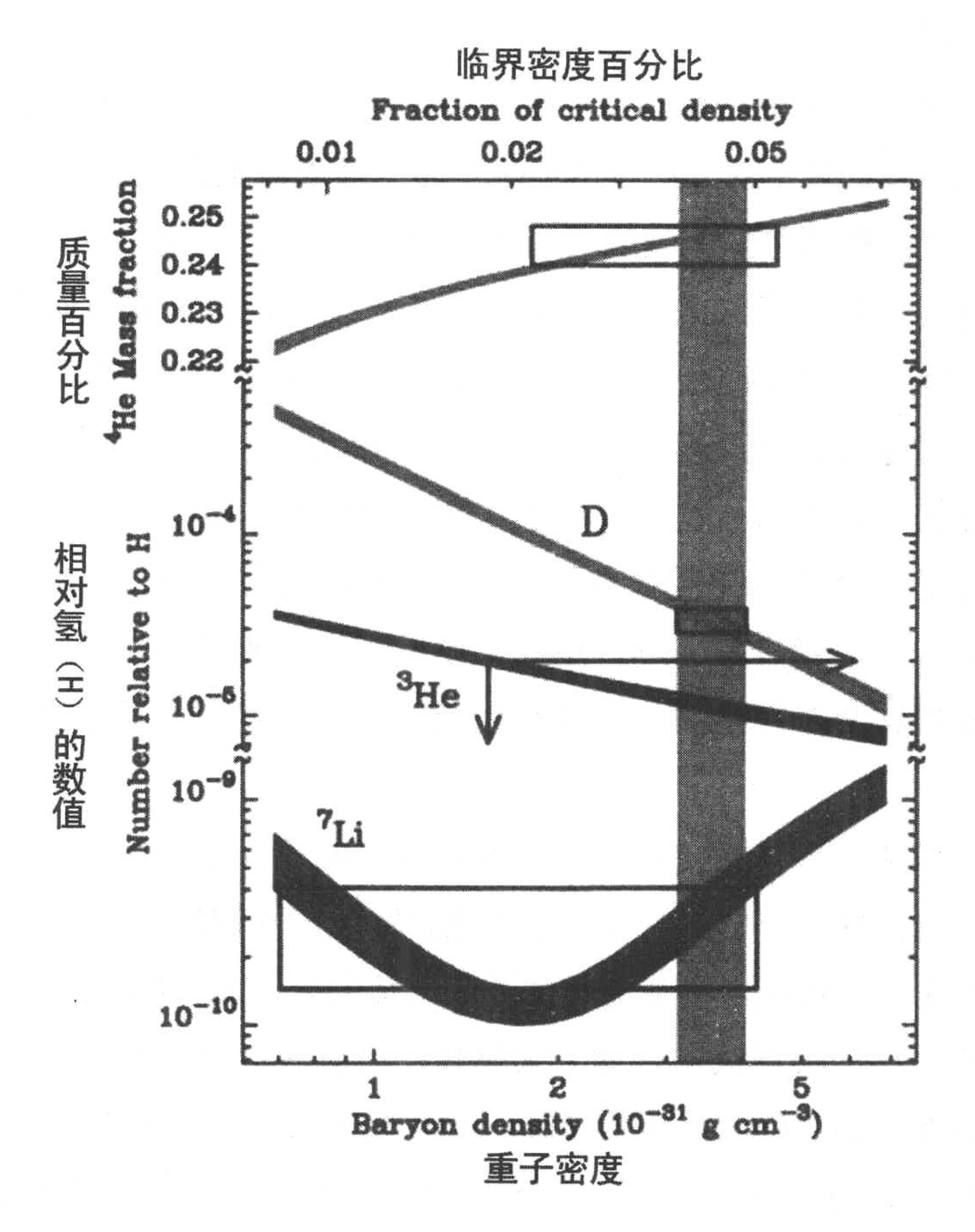
大爆炸的主要支柱、宇宙微波背景辐射是怎样提供婴儿宇宙的直接图景的？首先，未来的宇宙甚至还会膨胀得更快，宇宙微波背景辐射的温度会下降。只要可观测宇宙比现在大 100 倍，宇宙微波背景辐射的温度就会减少 100 个因数，其中保存的强度或能量密度将会下降 1 亿个因数，那时的探测就比现在困难 1 亿倍。

不过，我们即使在所有其他的地球电子噪音当中，还是能够观测到宇宙微波背景辐射。我们完全可以想象：遥远未来的观察者比今天精明 1 亿倍，因此，希望仍然存在。哎，事实证明：未来最聪明的观察者用最灵敏的仪器仍然必然失败。原因在于：银河系（或银河系及其邻近星系形成的超星系团，这些邻近星系从 50 亿光年外的仙女座星云开始）星体之间存在离子化热气，其中包含自由电子，由此形成了等离子体。我前面说过，这种等离子体对许多类型的辐射不透明。

这就是“等离子体频率”问题。等离子体吸收辐射，使之无法穿过。我们可以根据目前银河系观测到的自由电子密度，估计银河系等离子体频率。如果我们这样做，就会发现：大爆炸以后，宇宙膨胀大约 50 倍，背景辐射随之延伸，波长增加、频率降低。未来的超星系团等离子体频率势必降低。此后，无论观察者多么顽强，都没有足够的辐射可以观察超星系团。宇宙微波背景辐射也会消失。

因此，宇宙膨胀无法观测，大爆炸的余晖无迹可寻。轻元素（氢、氦、锂）丰度能否提供大爆炸的直接信号呢？

其实，我在第一章就说过：我只要遇见不相信大爆炸的人，就会把钱包里的卡片拿给他看。卡片上有下面的图表。然后，我就说：看！这就是大爆炸！



我知道：这个图表看上去很复杂，但它实际上显示了：根据目前的理解，氦、氘、氦-3、锂相对于氢的丰度。最上面的曲线向右上方延伸，显示氦的预测丰度。根据重量计算，氦是宇宙中第二丰富的元素，仅次于（最丰富的）氢。下面向下、向右的两条曲线代表氘和氦-3各自相对于氢的预测丰度。不是根据重量计算，而是根据原子数计算。最后，最下面的曲线代表锂的丰度，根据原子数计算。锂是原子量仅次于它们的轻元素。

预测丰度的用途是：推算今天宇宙（原子组成的）普通物质总密度。如果丰度值大幅度变化，所有元素预测丰度组合不符合观察，就是强有力的证据，不利于轻元素产生于大爆炸高热的假设。注意：预测丰度的变化范围大概有 10 个数量级。

各曲线上没有阴影的方形代表这些元素初始预测丰度的真实范围，根据我们星系内外的古老恒星和热气体观测数据绘制。

垂直的阴影带代表所有预测和观察都吻合的区域。很难想象：观察证实预测，还能比这些证据更有力。又一次，元素预测丰度的变化范围为 10 个数量级，有利于早期大爆炸产生轻元素的假设。

这样惊人的吻合蕴含另一层意义，值得进一步强调。只有在大爆炸最初几秒的高热状态，质子和中子的最初丰度才能产生接近于今天可见星系物质密度的结果。辐射密度将会留下残余，精确对应今天宇宙微波背景的密度。这样，核反应产生的氢、氘、氦、锂轻元素正好符合今天的数值。这些元素就是今天夜空中星体的基本成分。

爱因斯坦不怀好意地（可见他认为这是不可思议的）说：上帝不会创造这样一个宇宙，毫不含糊地指向大爆炸起源。

确实，宇宙氦丰度观测与估计值大体吻合，在 1960 年第一次获得证实。这个关键数据有助于大爆炸图景胜过非常流行的稳恒态模式，后者是弗雷德·霍伊尔（Fred Hoyle）及其同事证明的。

不过，在更遥远的未来，事情将会完全不同。例如，恒星燃烧氢，产生氦。目前观测到的氦大概只有百分之十五产生于大爆炸以后的恒星。这又是一个证据，说明：为了产生我们今天所见的宇宙，大爆炸必不可少。但在遥远的未来，情况会发生变化，因为已经有多少代恒星生生灭灭。

例如，当宇宙寿命达到 1 万亿年时，恒星产生的氦就会大大超过大爆炸产生的氦。情况如下图所示：

等到宇宙百分之六十的可见物质由氦组成，大爆炸产生的原初



氦元素一定不会符合观测值。

在遥远的未来文明中，观察者和理论家可以根据这些数据，确定宇宙年龄有限。恒星燃烧氢，产生氦。因此，氢和氦的比例存在一个极限，超过极限，恒星就不能继续燃烧。由此，未来科学家可以估计宇宙寿命不超过 1 万亿年，但没有大爆炸的任何直接征兆。未来独一无二的（超）星系自然产生的征兆却不缺乏。

不要忘记：勒梅特尔提出大爆炸理论，仅仅依据爱因斯坦相对论。我们可以设想：在遥远的未来，任何先进的文明都会发现物理定律、电磁定律、量子力学和广义相对论。遥远未来的勒梅特尔会不会提出大爆炸理论呢？

勒梅特尔的结论是：我们的宇宙肯定始于大爆炸，但遥远未来的可观测宇宙不一定推出这样的结论。宇宙物质在所有方向上都均匀一致，具备各向同性。根据勒梅特尔的推理和爱因斯坦最后的认

可，这样的宇宙不可能维持静态。这个宇宙是一个质量巨大的星系，周围环绕真空，爱因斯坦方程式对这样的宇宙有一个完美的解。毕竟，如果没有这样的解，广义相对论就不可能描绘孤立的物体，例如中子星，最后还有黑洞。

银河系这样巨大的质量分布不可能稳定。最后，我们的（超）星系会自行塌缩为巨型黑洞。爱因斯坦方程式的静态解描述了这种情况，称为史瓦西解（Schwarzchild solution）。但银河系塌缩成巨型黑洞的时间框架比宇宙其余部分消失的时间框架长得多。由此，未来科学家自然会想象：银河系存在于真空1万亿年以上，没有发生重要的塌缩，不需要周围的宇宙膨胀。

当然，众所周知：推测未来极其困难。其实，我撰写本书时，瑞士达沃斯（Davos）的世界经济论坛充满了千篇一律预测未来市场的经济学家。他们总是错得一塌糊涂，然后修改自己的预言。我经常发现：自然科学技术对遥远，甚至不久未来的预测比社会科学更夸张。确实，只要有人问我：不久后的科学或下一次大突破是什么，我总是回答：我要是知道，就会马上着手去做了！

因此，我常常想：我在本章内描述的未来图景多多少少像狄更斯（Dickens）《圣诞颂歌》（*A Christmas Carol*）的第三个幽灵。这是可能发生的未来。毕竟，我们不知道弥漫真空的暗能量是什么，因此无法确定它会像爱因斯坦的宇宙项一样保持恒定。如果不是这样，宇宙的未来就会大不一样。宇宙膨胀可能不会继续加速，但如果重新放慢，遥远的星系就不会消失了。何况，或许存在某些我们还没有探测到的可观测量，向未来天文学家证实大爆炸曾经发生过。

不过，根据我们今天对宇宙的全部了解，我描述的未来可能性最大。有没有什么逻辑、推理、经验数据能够诱导未来科学家推断宇宙的基本性质，还是永远在视野外模糊不清，是个非常有趣的问题。有些天才科学家探索自然力和粒子的基本性质，可能推导出理论图景：暗示暴涨确实发生过、真空含有能量，进而解释为什么可

见视野内没有星系。但我对此不太乐观。

毕竟，物理学是实验和观察推动的经验科学。如果我们没有经验性推出暗物质，我怀疑今天能有任何理论家敢于提出它存在。也可以想象，某些初步迹象暗示：没有大爆炸的单星系静态宇宙图景有问题。或许某些元素丰度观测出现异常。我怀疑，他们根据奥卡姆剃刀原则（Ockham's Razor）会提示：最简单的图景就是最正确的。于是，异常就归因于某些地方性因素。

我和鲍勃·舍勒提出：未来科学家将会运用可以证伪的数据与模型，这是科学的良好范例，但他们在这个过程中会得出错误的图景。从此以后，许多同事尝试提出探测未来宇宙真实膨胀的方法。我也能想象可能的实验，但不相信它们真会起作用。

例如：你必须排除银河系的明亮星体，将它们送进太空，等待10亿年后爆炸，在它们爆炸前根据距离观测速度，探索它们对可能的空间膨胀有没有额外的反冲。这个任务太困难了。即使你克服重重困难，未来的自然科学基金会没有论证宇宙膨胀的动机，实际上不可能资助这种实验。即使银河系某些星体向视野边界移动，自然逃逸、可以观测，我也不能肯定：这些物体的异常加速能够导出暗物质主导宇宙膨胀这样大胆而奇特的理论。

我们生活在当前的时代，可以自认为幸运。我和鲍勃写过一篇文章：“我们生活在非常特殊的时代……只有在这个时代，我们才能通过观测证实我们生活在非常特殊的时代！”

我们多多少少在开玩笑，但我们的主张是非常严肃的：即使运用最好的观测工具和理论工具，同样可以得出完全错误的大尺度宇宙图景。

不过，我应该指出：即使不完全的数据可以导致错误的图景，也有别于故意无视经验数据产生的错误图景，以便捏造原本与实际证据相抵触的创世论（例如地球低龄），或是支持没有观测证据的存在（例如神圣智慧）。他们的目的是协调创世论和先天的偏见，

甚至更糟，迷恋神话。神话在问题提出以前就作了答复。未来科学家的估计至少有他们可以利用的证据支持。我们科学家都会这样，新证据可以改变原来的实在图景。

在这方面应该补充说明：甚至今天，我们仍然可能忽视了10亿年前或100亿年后可以观测到的东西。虽然这样，我应该强调：大爆炸一般性图景依据充分，各方面数据普遍可靠。不过，新数据有可能突然出现。还有遥远未来、遥远过去或大爆炸起源的细节理解，空间可能存在的独特性。其实，我希望新材料出现。生命和智慧可能在未来宇宙中灭绝，我们可能从中学到教训：虽然宇宙学家很难保持谦逊，但我们提出假设时还是要敬畏宇宙。

无论如何，我前面描述的场面虽然同样悲惨，却都具有诗意的对称。在遥远的未来，科学家推出的宇宙图景酷似上世纪初。这种图景本身就催生了现代宇宙学革命。宇宙学将会兜一圈返回原地。我觉得很有意思，即使它强化了许多人的观点：我们是太阳系的匆匆过客，一切皆虚无。

不过，宇宙学结局的根本问题可能在于：我们只有一个宇宙可以验证，就是我们所在的这个宇宙。我们希望通过观测理解宇宙，但测量和数据解释都受到限制。

如果宇宙不止一个，我们有许多探测对象，我们就有较好的机会：理解观测的真正重要意义，区分那些纯粹的偶然事件。

我们接下来会看到：后一种可能性不大，前一种完全不可能。科学家通过新实验、新推测，让我们进一步理解宇宙出乎意料的奇怪特征。

不过，我们在继续之前，最好以另一种未来图景收场。这种图景更有可能、更符合原意，与本书题材特别有关系。克里斯多弗·希金斯针对我刚才描述的场面，提出了这种图景。他说：“如果你认为所在宇宙有物很重要，只要等待就行。无物正向我们迎头冲过来！”

第八章　重大意外事故？

一旦你假设了造物主和计划，人类就成了残酷实验的对象。由此，人类创造就是悲惨的隶属。

——克里斯多弗·希金斯

我们执着地相信，我们遭遇的一切都有重要意义。我们梦见一个朋友扭坏了手，第二天就发现她扭伤了脚。哇！宇宙！是不是超感觉？

物理学家理查德·费曼喜欢站起来对人们说："你们不会相信，我今天遇见了什么！你们不会相信的！"人们问他出什么事了，他就说："一无所有！"他以这种方式暗示我在前面描写的梦幻状态，人们赋予其重要意义。但他们忘记了大量毫无预言价值的梦。我们忘记了一天大部分的时间，然后，在遇到异常事件方式时，我们误读了几率的本质。只要发生的事件足够多，其中总会有一些异常事件。

这怎样才能应用到我们的宇宙上？

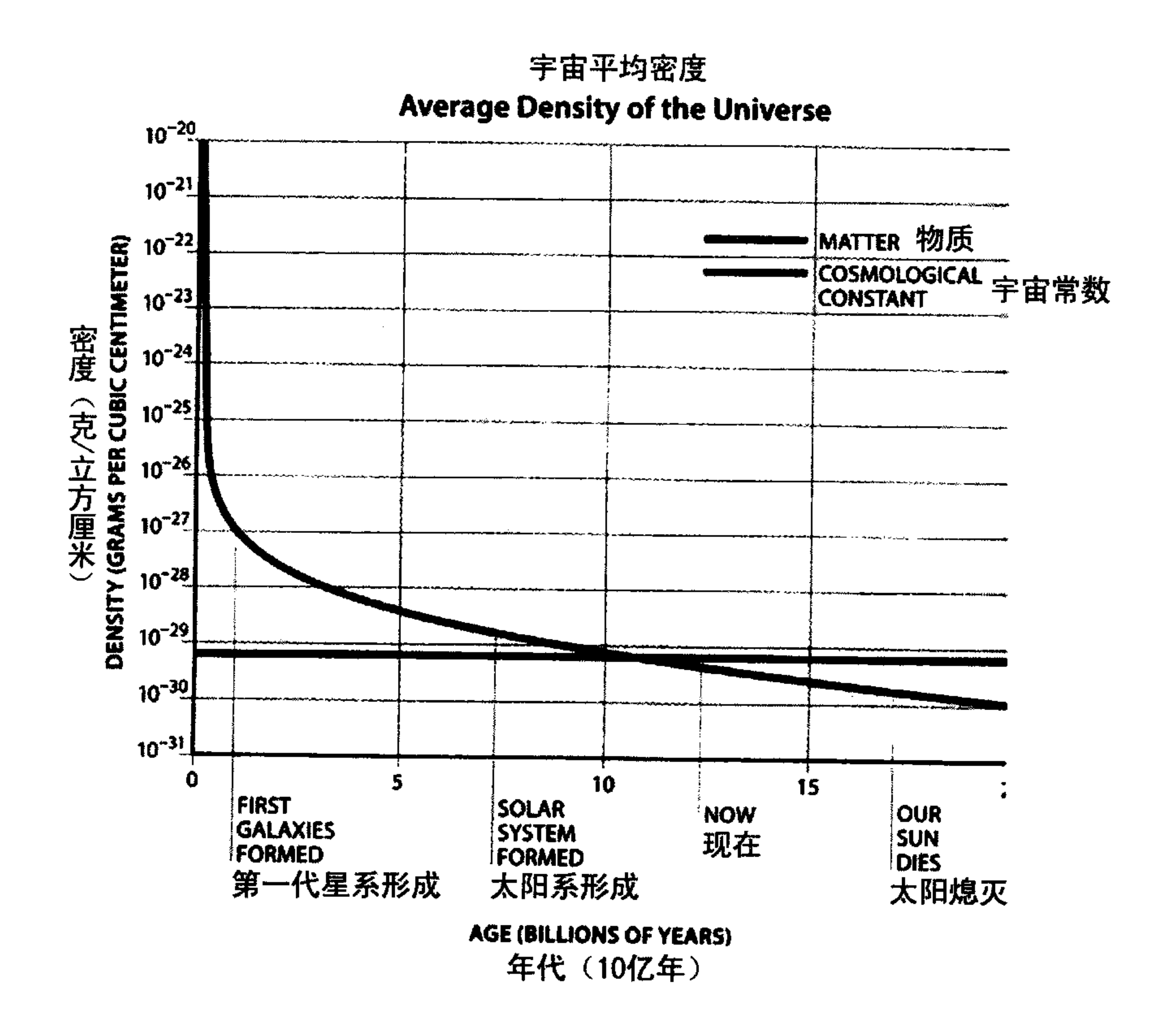
在这个发现以前，真空能量不仅不等于零，而且数量级小于粒子物理学的理论估计 120 个数量级。物理学家的传统观念认为：我们测量自然，获得的所有基本参数都有意义。以我之见，我们以基本原理为基础，就能最终理解有关的问题：为什么重力比其他自然力弱得多？为什么质子比电子重 2000 倍？为什么基本粒子有 3 大类？换一种方式说：我们一旦理解了在最小尺度上主导自然力的基本定理，目前所有未解之谜都会迎刃而解，因为它们都是这些定理的自然结果。

（在另一方面，纯粹的宗教论争尽量走极端。他们声称：每一个基本常数都有意义，因为上帝大概选择了每一个数值，这是上帝宇宙计划的一部分。就此而言，没有什么偶然事件。同样，没有什么可以预测和解释。论争唯一的目的和用途只关系到统治宇宙的物理定理，而不是给信徒提供安慰。）

不过，真空有能量的发现开始促成许多物理学家探讨：什么是大自然必须的，什么可能是偶然事件。

新结构的催化剂源于我上一章的论证。今天可以测量暗能量，因为只有在宇宙这一时期真空能量与真空物质的能量密度相当。

我们为什么生活在宇宙历史的特殊时期？确实，哥白尼以后，科学的方方面面都要面临这个问题。我们已经明白：地球不是太阳系的中心。太阳是银河系外侧一颗孤星。银河系是可观测宇宙的

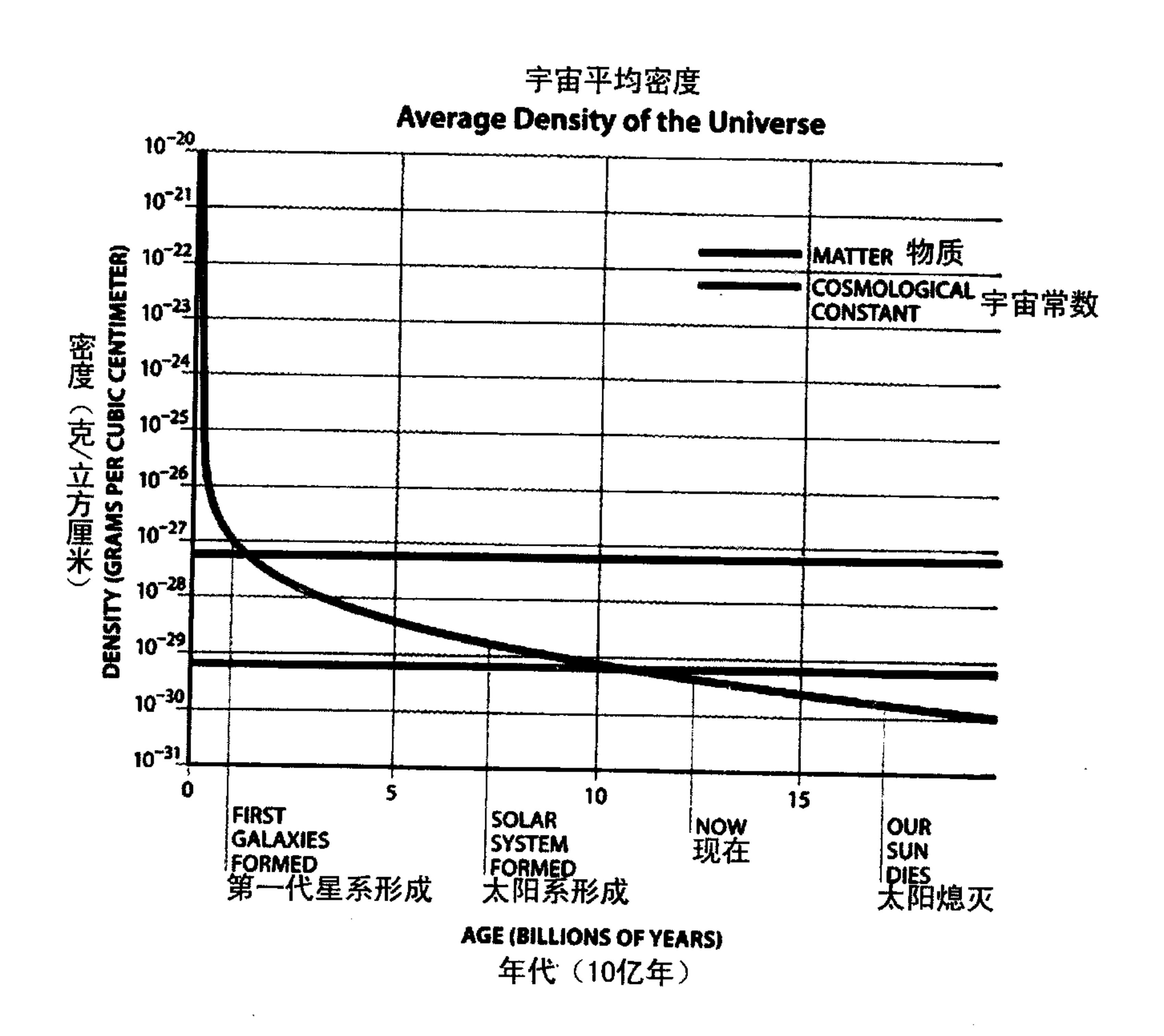


4000亿星系之一。我们已经接受“哥白尼原则”：我们在宇宙时空中没有特殊地位。

不过，真空能量揭示：我们确实身在宇宙特殊时期。左图最好地演示了“时间简史”。

两条曲线代表宇宙所有物质的能量密度、作为时间函数的真空能量密度（假设的宇宙常数）。你可以看出：不出所料，随着宇宙膨胀，物质密度下降（星系距离更大、物质更稀释）。不过，真空能量密度保持恒定，理由是真空没有什么可以稀释的！（我有些戏谑地说，宇宙膨胀作用于真空。）现在两条曲线近距离相交，刚才说的奇特巧合就源于此。

如果真空能量比我们今天的估计值大50倍，两条曲线就会在更早的时间相交。如下图所示：



两条曲线相交点更高，大爆炸以后大约10亿年，星系形成时的真空能量值更大。不过，不要忘记：真空能量是排斥力。如果星系形成前，真空能量主导宇宙，那么，能量的排斥力就会压倒（字面上）聚集星系的正常万有引力。星系就不会形成！

如果星系没有形成，恒星就不会形成。如果恒星没有形成，行星就不会形成。如果行星没有形成，天文学家就不会形成！

因此，如果真空能量超过观测值50倍，显然今天就不会有观测能量的人。

这能说明什么问题？宇宙加速膨胀发现后，物理学家斯蒂文·温伯格（Steven Weinberg）提出：根据10年前（暗能量发现前）的论证，如果今天测量的宇宙常数值多少符合人择原理，巧合问题就可以迎刃而解。如果宇宙有许多种，真空能量值随机分布，只有数值接近于我们测量值的宇宙才能演化出生命。因此，我们所在的宇宙真空能量低，原因是真空能量高的宇宙不会有我们。换句话说：我们生活的宇宙就是能让我们生活的宇宙，不足为奇！

不过，必须有许多不同的宇宙产生，这种论证才真正有意义。许多不同的宇宙，听起来像是自相矛盾。毕竟，宇宙的传统意义就是包罗万象。

不过，最近宇宙有了一个更简单、更有争议性的意义。传统观念认为：宇宙包括我们过去现在所见的一切。因此，宇宙实质上包括过去现在影响我们的一切。

选择了这种宇宙定义，就可能存在其他区域：后者从来不曾接触或影响我们，至少在理论上可能存在。各宇宙犹如空间大洋中的岛屿，互不联接。

我强调过：我们的宇宙极其浩瀚，其中某处不是不可能出现这样的情况。小概率时间始终不断发生。你可能想知道：各宇宙或目前观念的“多重宇宙”是否适用于同样的定律。事实证明：这种理论假设远远不止是可能性。促进当前粒子理论发展的中心思想显然

需要多重宇宙概念。

我强调这一点，是因为有些讨论对手觉得需要造物主，认为多重宇宙是物理学家逃避回答问题的遁词。最后可能是这样，但现在还不是。小尺度物理定律扩张的几乎所有逻辑可能性形成更完整的理论，暗示我们的宇宙在大尺度上并不独特。

或许暴涨提供了第一个，也是最好的阐释。在暴涨的宇宙图景中，巨大的能量临时主导宇宙某些区域，这个区域开始自发地膨胀。在某一个时刻，伪真空小区域可能在相位转换中退出暴涨，释放真正的低能量值，这个区域的膨胀就不再是自发的。在任何时刻，如果相位转换没有遍及所有空间，几乎所有空间都在膨胀区域内。膨胀区域跟首先退出膨胀的区域分离，双方的距离深不可测。这就像火山喷发岩浆，有些岩浆冷却、凝固，但漂浮在液态岩浆海洋上的岩石会彼此分离。

情况甚至更有戏剧性。安德里·林德（Andre Linde）和艾伦·古斯都是现代暴涨理论的总设计师。1986 年，他们甚至探讨了更普遍的可能性。另一位移居美国的俄罗斯天才物理学家亚历克斯·维棱肯（Alex Vilenkin）也在某种意义上预见了这种理论。林德和维棱肯都有伟大俄罗斯物理学家的自信心，但他们的经历完全不同。林德在前苏联物理学机构供职，苏联瓦解后移居美国。他性情急躁、才华横溢、风趣幽默，在此期间继续主导粒子理论宇宙学。维棱肯移民更早，在美国当守夜人，同时攻读物理学课程。他一直对宇宙学感兴趣，却阴差阳错做了凝聚态物理学毕业论文。后来，他在凯斯西部保留地大学做博士后研究，我最后在这所大学任教。在此期间，他问导师菲利普·泰勒（Philip Taylor）：能不能在拟定的项目以外，每星期花几天时间研究宇宙学。菲利普后来告诉我：亚历克斯虽然身兼数任，仍然是他见过的最多产博士后。

无论如何，林德认识到：暴涨期间的量子波动可以推动整个场域，将暴涨降至最低能级，由此提供了优雅退场。某些区域的量

子波动总是有可能推动整个场域，升至更高能级，由此远离暴涨结束时的数值。因此，暴涨不会衰退。这些区域膨胀时间更长，因此比其他区域有更多空间可以膨胀。在这些区域里，量子波动又会推动某些亚区域退出暴涨，由此自发停止膨胀。又一次，有些区域膨胀时间更长。如此这般。

林德称这幅图景为“混沌暴涨”，确实类似地球上的混沌系统。例如，沸腾的燕麦粥。气泡不断在表面上爆炸，反映高温液态区域完成相位转换，变成蒸汽。但燕麦粥在泡沫之间翻滚涌动，大尺度井井有条——到处都有泡沫爆炸，但局部各有千秋。混沌膨胀宇宙就是这样。如果碰巧位于停止暴涨的基态“泡”，就会跟周围继续膨胀的大部分空间迥然不同。

在这幅图景中，暴涨是永恒的。有些区域（其实是大部分空间）永远膨胀。退出膨胀的区域就跟宇宙整体失去了联系。我强调多重宇宙不可避免，因为暴涨是永恒的。迄今为止，在大多数（如果不是全部）暴涨图景中，永恒暴涨的可能性最大。正如林德在 1986 年的论文中所说：

> 为什么我们的宇宙是唯一可能的宇宙，这个古老的问题现已不复存在。可能存在我们类型的多重宇宙理论取而代之。这个问题仍然非常困难，但比前一个更容易。根据我们的观点，发展暴涨宇宙图景最重要的一项后果，就是修正了宇宙的整体结构和我们在世界上的位置。

正如林德的强调，图景澄清以后，提供了另一种物理学新可能。暴涨宇宙很容易退化为各种低能级量子态。宇宙各区域量子态分布不同，因此不同区域的物理学基本定律可能不一样。

这是前述人择原理的第一个“景观”，可以自行展开。暴涨以后，我们的宇宙可能结束于许多种不同状态。或许，我们所在的宇宙就

是其中之一。真空能量不为零，但足够小，星系可以形成。潜在的可能性无穷无尽，好奇的科学家选择了我们的宇宙，因为它能支持星系、恒星、行星和生命。

不过，“景观”第一次用在这种语境中。过去四分之一世纪发展的粒子理论（弦理论）声势浩大，为这种用法提供了有力的营销。弦理论假设：组成基本粒子的更基本成分不是粒子，更接近于颤动的弦。小提琴弦颤动，产生不同的音质，同样，颤动的弦产生物体，效果类似我们在自然界发现的基本粒子。不过，这种理论在数学上不符合只有四维的世界，需要更多维度才能合理化。就理论而言，其他维度的情况一开始并不明显，弦以外的其他物体并不重要。只是有些没有解决的问题自己暴露出来，损害了对理论的早期热忱。

本书无意全面评介弦理论。其实，全面评介大概也不可能，因为过去 25 年已经弄清楚：以前所谓的弦理论显然更精密、更复杂，某些基本性质和组成仍然是不解之谜。

我们仍然不知道：这个了不起的理论大厦是否与真实世界有关。虽然弦理论浸淫物理学界之深，鲜有伦比，但还没有成功地实验解决任何一个自然之谜。

许多人认为最后这句话是在批评弦理论。我以前虽然是其登记认证的反调分子，但在本书和多次讲座中，跟我的朋友、弦理论主要支持者布里安·格林（Brian Greene）辩论时，却没有这样的意思。相反，我认为：向公众宣传现实检验非常重要。弦理论的理念和数学令人叹服，照亮了理论物理学最基本的矛盾——无法整合爱因斯坦广义相对论和量子力学，合理预测宇宙极小尺度的运作。

我已经写过一本关于弦理论的书，涉及这个问题的方方面面。但本书的目的只是简要介绍。弦理论虽然难以操作，但中心思想非常简洁。在宇宙极小尺度上，相应的问题是：重力和量子力学第一次遭遇，基本弦卷曲为闭环。闭环在一系列刺激下，持续表现基本粒子的特性。在量子理论中，引力子取代了重力。于是，弦量子理

论大体上为真正的重力量子理论提供了场所。

可以肯定，这种理论能避免标准量子重力理论尴尬的无穷大预测值。无论如何，这是一大成就。这种理论最简单的版本可以这样排除无穷大预测值：如果用颤动的弦代替基本粒子，我们熟悉的三维空间一维时间就变成了二十六维！

你可能会预料：复杂性（或信仰）的飞跃足以使大多数物理学家望而却步，但1980年代中期，最著名的数学家爱德华·威腾（Edward Witten）在高等研究院大显身手，证明这种理论远胜于量子重力理论。新数学对称性引进后，最有力的数学工具称为“超对称性”，协调一致所需的维度值从二十六下降到十。

不过，最重要的是：弦理论的内容可以在一个统一理论中，整合重力和其他自然力，而且还能解释每一种已知的自然基本粒子。最后，似乎独特的十维理论能够重现我们在四维世界中所见的一切。

自称的“包罗万象理论”不仅在科学文献，而且在通俗文学中开始流行。结果，“超弦”比“超导性”更闻名。“超导性”就是：有些物质在极低温度下导电没有电阻，不仅涉及低温物质导电性，还改变了我们对物质量子构造的理解。

哎，此后25年，弦理论没有这样的发展。虽然全世界最好的理论家集中力量于此，新书卷帙浩繁，数学新方法不断产生。（例如，威腾赢得了数学最高奖项。）显然，弦理论中的弦可能根本不是基本物质。另一些更复杂的结构，例如膜（得名于细胞膜），存在于更高的维度，可能支配理论的运作。

更糟的是：这种理论的独特性开始消失了。毕竟，我们的经验世界不是十维，而是四维。有些事物只能存在于六维空间，它们不可见的权威解释是“紧化”——也就是说：它们在极小尺度上卷曲，在我们的尺度上无法解开，即使今天的高能粒子加速器都探测不到。

这些看不见的领域不同于灵性和宗教的领域，哪怕它们表面上有相似之处。首先，它们只需要更强大的加速器就可以探测——虽

然不现实，但并非不可能。其次，人们可以希望：探测四维宇宙，可以发现虚拟粒子影响物质的间接证据。简而言之，因为它们是理论的一部分，理论的目的是解释全宇宙，而非辩护。它们最终可以付诸经验性证实，即使可能性很小。

但除此之外，存在额外维度的可能性对我们宇宙独一无二的希望提出了巨大挑战。即使从独特的十维理论开始（我重复一下：我们还不知道它是不是存在），每一种紧化无形六维的方法都会产生不同的四维宇宙、不同的物理定律、不同的力、不同的粒子，受到不同对称性的支配。有些理论家估计：一种十维弦理论大概能产生10500种不同的四维宇宙。“包罗万象理论”突然变成了“随心所欲理论”！

这种情况活像我最喜欢的科学连环漫画“xkcd”。漫画里，一个人对另一个人说：“我刚才想到一个了不起的想法。如果所有物质和能量都由颤动的细微弦组成，该怎么样。”第二个人接着说：“OK，你这是什么意思？”第一个人回答说：“我也不知道。”

还有一个段子，搞笑程度略低。诺贝尔物理学奖得主弗兰克·维尔切克（Frank A.Wilczek）提出：弦理论家创造了一种做物理学的新方法，令人想到玩飞镖。首先向空墙上扔飞镖，然后跑到墙跟前，把牛眼插在飞镖打中的地方。（译者按：就是先开枪，再围着枪眼画靶圈的意思。）

这可能有点刻薄。毕竟，这些理论家诚实地工作，想揭示支配我们所在世界的基本原理。可能的四维宇宙太多，过去使弦理论家感到尴尬，现在却成了弦理论的优点。可以想象：一个十维“多重宇宙”可以嵌入不同的四维宇宙（或者五维、六维，诸如此类），每一个宇宙都有不同的物理定律。而且，每一个宇宙的真空能量值可能各不相同。

听起来很方便，似乎是理论的自然结果。创造真正的多重宇宙“景观”，从而提供了自然框架：真空能量值正好适合发展人类理解力。

就此而言，我们不需要在三维空间内分离的无穷多宇宙。相反，我们能想象：无穷多宇宙积累在我们空间中的一点上，我们看不见，但各有千秋。

我想强调一下：这种理论并不像圣•托马斯•阿奎纳（St. Thomas Aquinas）的神学冥想那么琐细。他沉思针尖（通俗版是别针）上能容纳几个跳舞的天使，后来的神学家嘲笑他徒劳无益。阿奎纳事实上自己回答了这个问题，他说：同一个地方不能容纳超过一个天使——当然没有任何理论和实验依据！无论如何，如果天使是玻色子量子，他肯定就错了。

人们可能会希望：有了这样的图景和充分的数学手段，精确的物理预测原则上可以实现。例如，“概率分布”推出了类似的可能性：各种四维宇宙嵌入更大的多维多重宇宙。人们可以发现：大部分宇宙的真空能都很小，也有三类基本粒子和四种不同的力。或者，人们会发现：只有真空能很小的宇宙才能存在电磁力这样的长程力。所有这样的结果都可以提供合理的有力证据，支持真空能的人择概然性解释，具有可靠的物理意义。换句话说：发现像我们这样的低真空能宇宙，并不是不可能。

不过，数学还没有发展到这个境界，或许永远到不了这一步。我们目前虽然缺乏理论能力，并不意味着这种可能性本质上不能存在。

虽然如此，在此期间，粒子物理学家还是进一步发展了人择原理。

粒子物理学家总是走在宇宙学家前面。宇宙学家造出神秘的整体量：真空能，我们对此几乎一无所知。不过，除了真空能的数值以外，粒子物理学家同样一无所知！

例如：为什么有三代基本粒子：电子；其更重的表亲介子和陶子；三种夸克。低能级的两种组成了我们在地球上发现的物质？为什么重力比自然界存在的许多力（包括电磁力）弱得多？为什么质子比电子重 2000 倍？

有些粒子物理学家将人择原理推向极端，或许是因为他们用物理学解释这些原因，但没有成功。毕竟，如果大自然的一项基本常数只是偶然事件的产物，为什么所有其他常数不是？粒子理论所有未解之谜都可以归因于一句万灵符咒：如果宇宙不是这样，我们就不会在这里！

人们可能会好奇：自然之谜到底有没有答案？或者，这是不是我们理解的科学？这一点更重要。毕竟，过去450年来，科学（尤其是物理学）一直在解释：为什么宇宙必须是我们测量的样子？而不是：为什么同样的自然律会产生完全不同的宇宙？

我尝试解释：为什么这一次不完全是这样。也就是说：为什么许多可敬的科学家转向人择原理；为什么一批人致力于寻找新的宇宙基本原理。

我们现在更进一步，探讨永远无法探测的宇宙如何存在。有的远在天边，实质上等于无穷远。有的近在眼前，可能藏身于额外维度的显微尺度内。虽然如此，仍然是某些经验检测的对象。

例如，想象一下：我们推出某种大统一理论，将四种基本自然力当中的至少三种统一起来。粒子物理学家对这个题目始终抱有强烈的兴趣（在那些没有放弃四维基本理论的人当中）。这种理论就会预测到我们测量的自然力和我们在加速器中探测到的基本粒子光谱。这样的理论会产生许多预测，随后在实验中证实，我们有充分理由怀疑：其中含有真理的胚芽。

现在，设想这种理论也预测了宇宙早期暴涨。事实上，它预测我们的暴涨只是多重宇宙永恒暴涨的一段插曲。即使我们无法探测视野外区域的存在，如前所述：走路像鸭子，叫声像鸭子……嗯，你明白的。

支持额外维度存在的经验证据更加牵强附会，但不是不可能。许多聪明的年轻理论家为此投入了自己的职业生涯，希望发展的理论能够找到即使是间接的证据。他们的希望可能用错了地方，但他

们已经用脚投了票。或许日内瓦大型强子对撞机会发现某些新证据，为新物理学打开原本隐藏的窗口。

过去100年，我们对自然界的理解确实成就斐然、史无前例，有能力在以前无法想象的尺度上探测宇宙。我们理解了大爆炸的性质，将宇宙膨胀回溯到最初几微秒，发现了数千亿新星系和新星体。我们已经发现：宇宙百分之九十九的部分实际上不可见，主要包括暗物质和暗能量。暗物质最有可能是某种新型基本粒子。暗能量至今仍然完全神秘。

综上所述，物理学可能变成某种“环境科学”。长期以来，人们一直认为宇宙基本常数有特殊的重要性，现在发现基本常数可能只是环境偶然事件的产物。我们科学家容易过分严肃地对待自己和科学，可能对待宇宙也过分严肃了。从字面上和比喻意义上讲，我们都是无中生有的产物。至少，我们可以从主导宇宙的真空中获得很多！或许，我们的宇宙在多重宇宙中，犹如一滴泪水藏身于大洋，或许，我们永远不会发现一种理论，能够描述宇宙为什么这样运作。

或许，我们能做到。

最后，这就是我们目前理解的实在最精确的图景：基于过去100年来成千上万人的奉献。他们设计了有史以来最复杂的仪器，发展了有史以来最美丽、最复杂的观念。人类居于这幅创造图景的精华部分，有能力想象存在的广泛可能性，勇敢地探索他们，不把责任推卸给含糊不清的创造力或造物主。造物主根据其定义，永远深不可测。我们从经验获得了这些智慧，不应该辜负这些聪明勇敢的人。是他们帮助我们，达到了目前的知识水准。

我们如果希望得出自己存在、意义和宇宙自身意义的哲学结论，就应将结论建立在经验知识上。真正开放的心灵意味着：无论我们喜不喜欢结论的意义，都要强迫想象力服从真实的证据，而非相反。

第九章 虚空原有物

我不介意未知。这吓不倒我。

——理查德·费曼（Richard Feynman）

伊萨克·牛顿爵士或许是古往今来最伟大的物理学家，在许多方面深刻改变了我们认识宇宙的方式。但他最重要的贡献大概是：他证明了宇宙可以解释。他运用万有引力定律，第一次证明：即使天国也服从自然律的力量。宇宙根本不是那种陌生、敌意、恶意，似乎反覆无常的世界。

如果支配宇宙的法则亘古不变，希腊罗马神话诸神就显得虚弱无力了。诸神不再有武断任性的自由，不能折腾世界，给人类制造麻烦。宙斯（Zeus）如此，以色列的耶和华（Jehovah）同样如此。如果太阳并没有围绕地球运转，太阳穿过天空是地球公转的结果，耶和华怎么可能让太阳停在正午？如果太阳突然停下来，地球表面受到的冲击足以毁灭人类及其一切建树。

当然，各地的奇迹都是超自然的。毕竟，超自然就是那些破坏自然法则的事情。上帝既然能够随心所欲地创造自然法则，想必也能随心所欲地破坏自然法则。几千年前，现代通讯纪录工具还没有发明，奇迹层出不穷，现在却销声匿迹，岂非启人疑窦。

无论如何，即使宇宙没有奇迹，你面对深刻简洁的宇宙秩序，还是可以得出两种结论。一种是牛顿本人的结论，有以前的伽利略（Galileo）和多少年来大批科学家的支持，认为自然秩序是神圣智慧的创造。不仅宇宙，而且人类自身也是神圣智慧的创造，造物

主根据自己的形象造人（显然还有其他复杂而美丽的事物！）。另一种结论是：自然律自身就是一切。自然律自身要求宇宙存在、发展、演化。我们无法改变自然律造成的后果。自然律是永恒的，或者产生于某些现在还不知道，但可能纯属物理的因素。

哲学家、神学家，往往还有科学家继续争论这些可能性。我们不确定哪一种真实体现了我们的宇宙。但我在本书开头就强调了要点：这种问题的最终裁决不会源于希望、渴望、启示或纯粹思维。如果答案确实存在，也只有探索自然才能发现答案。本书开头引证了雅各布·布朗诺夫斯基的话。他说：无论美梦还是噩梦，我们需要睁开眼睛，依靠经验生活。在这里，一个人的美梦很容易变成别人的噩梦。无论我们喜欢不喜欢，宇宙就是这个样子。

在这里，我认为宇宙无中生有极其重要。我会尽力说明其意义。宇宙自然产生，甚至不可避免地跟我们了解的世界万物协调一致。这种了解不是源于哲学和神学，它们都牵涉道德或其他人类状况的推测。如前所述，经验宇宙学和粒子物理学一日千里、成就卓著，论证理应以此为基础。

由此，我回到本书开始时的问题。“宇宙为什么有物，而不是空无？”我们现在有了更好的推断依据，回顾现代科学的宇宙图景、历史和可能的未来，操作性描述“空无”的真实组成。正如我在本书开头的暗示，科学经常提到这个问题，诸如此类的哲学问题同样如此。这个框架并不需要造物主。造物主的含义如此多变，以至于原始意义已经所剩无几。又一次，经验知识照亮了我们想象力原本黑暗的角落，并不是不寻常。

同时，在科学问题上，我们不得不对“为什么”格外谨慎。我们问“为什么”，往往是想知道“怎么样”。只要后者有了答案，通常就已经实现了目的。例如，我们可能会问：“为什么地球离

太阳9300万英里？”但我们真正的意思是：“地球怎么会离太阳9300万英里？”也就是说，我们的兴趣在于：什么物理过程导致地球处在现在的位置？“为什么”隐含有目的的含义。我们用科学术语解释太阳系，一般不提目的。

因此，我要假设这个问题真正的意思是：“宇宙为什么有物，而不是空无？”我们研究自然界，只能准确回答“怎么样”的问题。不过这句话听起来有点拗口，我只好请求读者原谅：我往往会自食其言，使用常见的套话。其实我本来想用更专业的“怎么样”。

甚至在这里，从实际理解的角度出发，应该用一系列更有成果的问题代替这个特殊的“怎么样”问题。“在目前的时刻，宇宙最显著的特性如何产生？”或者，更重要的问题是：“我们怎样才能发现？”

在这里，我想再做一次无用功。用这种方法设计问题，可以产生新知识和新理解。因此，它们不同于纯粹的神学问题，神学问题一般都有预设的答案。其实，我曾经向几位神学家挑战，提出跟神学假设抵触的证据。神学假设至少在过去500年内没有进步，而500年前的科学不过初试啼声。迄今为止，没有人提供反例。我获得的收获大部分是质疑。“你是说通过知识？”从认识论角度看，这个问题颇为棘手。但我坚持认为：如果有更好的替代答复，早就会有人提出了。如果我向生物学家、心理学家、历史学家或天文学家提问，他们都不会这么混乱。

这种问题涉及理论预测，可以跟更直接推进宇宙操作知识的实验相比。部分由于这个原因，我在本书中强调这一点。虽然如此，“无中生有”问题仍然流传甚广，因此必须面对。

无论你是否相信宇宙天然合理，牛顿的工作戏剧性地减少了上帝统治的领域……牛顿定律不仅严重限制了神明的行动自由，还取

消了各式各样的超自然要求。牛顿发现：环绕太阳的行星运动无须持续推动，而是严重违反直觉，受到日心吸引力支配。于是，以前引导行星运动的天使不再有必要存在了。天使失去了这种特殊功能，几乎没有影响人们相信天使的愿望。（民意测验显示：相信天使的美国人多于相信进化的美国人。）可以公正地说：牛顿以后的科学进步，大大限制了上帝之手大显神威的机会。

我们回溯宇宙演化，直到大爆炸早期，除已知物理定律外，没有其他特殊需要。我们还可以描绘宇宙可能的未来。我们不了解的宇宙肯定仍然令人困惑，但我假设本书读者并没有接受“救场的神明”概念——只要我们的观测似乎令人困惑或难以充分理解，就以上帝为口实。甚至神学家都明白：这种口实不仅损害了全能上帝的伟大，而且还会造成以下危险：一旦以后的进展排除或解释了原有的疑难，“救场的神明”就会遭到排除，或是进一步受到冷落。

在这种意义上，“无中生有”论争确实集中于创世起源问题，质问科学解释能不能合乎逻辑地完成、充分说明这个专门问题。

事实证明：根据我们目前对自然的理解，“无中生有”存在三种各不相同的涵义。最简单的答案是：“差不多就是这样”。我会在本书剩下的部分阐明“为什么”的问题，或者如前所述，阐明更重要的“怎么会”的问题。

根据奥卡姆剃刀原则，物理上成立的事件无须额外寻找存在理由。全能的神明必须置身于宇宙或多重宇宙之外，同时支配宇宙内部的进程。（译者按：这是常见的误解，但许多基督教和伊斯兰教神学家认为：上帝并不在宇宙之上、之前、之外，二者也不是平行对等的关系。相反，物质宇宙是神性的附属特性之一。神性大于并包含全部物质世界，后者是前者的一个子集，无法充分认知前者。）于是，神明就是最后，或者不如说最初的王牌。

我已经在本书前言论证过：在物理学中，仅仅将“空无”定义为“无物”，并不解决问题。更常见的是，科学不适于提出问题。

我可以在这里附带提出一种更专业的论证。设想原子核附近的真空自发产生电子－正电子对，电子－正电子对在其存在的短时期内影响原子特性。在此之前，电子－正电子对在什么意义上存在？显然没有任何合理的定义。它们的存在肯定有潜能，但不会超过人类的潜在可能性。我的睾丸有精子，身边的女人正在排卵；我们交配的潜在可能性就是这么大。确实，我听到的最佳答案是："无物"犹如你受孕成胎前引起的感受。无论如何，存在潜能就像手淫，肯定不会像现在的堕胎争议一样，引起敏感的法律问题。

我指导亚利桑那州立大学（Arizona State University）的起源项目。最近，项目成立了一个生命起源研究小组。涉及这方面，我必须回顾目前的宇宙学争论。我们还没有充分理解地球上的生命是如何起源的。不过，我们掌握了孕育生命的可信化学机制，RNA这样的生物分子自然起源的机理也日益清晰。而且，达尔文主义以自然选择为依据，提出的生物演化图景精确可信。最初的忠实自我复制细胞通过新陈代谢从周围环境汲取能量（我目前认为，这就是生命的正确定义），演进产生复杂的地球生命。

达尔文虽然半心半意，还是将神意干预排除在现代世界生物进化和生命散布地球的过程之外。（不过他为上帝的干预保留了一扇门：最初生命的形成。）根据我们目前对宇宙过去和未来的理解，无中生有、无须神意干预，更有说服力。考察相关细节，在观测和理论上都有难度，因此我估计在这方面永远不会超过大致可信的水平。但照我看来，大致可信就是一个重要的进展。虽然宇宙的存在和消亡大概没有目的，我们肯定不在宇宙中心，我们仍然可以鼓起勇气，在宇宙中度过有意义的生活。

我们现在回顾宇宙最重要的特征之一：测量结果近乎平坦。不要忘记，平坦宇宙有一个独特之处：至少在星系构成物质主导的尺

度上，牛顿物理学大体可靠。在平坦宇宙中，而且只有在平坦宇宙中，参加宇宙膨胀的所有物体平均牛顿重力能精确为零。

我强调：这是可以证实的基本条件。宇宙只能这样。只要宇宙自然无中生有，或者几乎无中生有。理论推测必须如此。

我无论怎样强调这一点，都不会过分。只要宇宙推测包括重力，就不能任意确定系统总能量或正负补充能量。宇宙膨胀携带的总重力能不能武断确定，宇宙几何曲率也是一样。根据广义相对论，这是空间本身的特性。空间这种特性取决于空间蕴含的能量。

我这么说的原因是：在平坦的膨胀宇宙中，平均牛顿重力能武断确定为零。其他数值都没有问题，但“确定”零点的科学家的目的就是反对上帝。无论如何，迪尼斯•德索萨（Dinesh D’Souza）跟克里斯托弗•希金斯争论上帝存在时，就是这么说的。

大错特错。科学家50年来致力于确定宇宙曲率，目的是判断宇宙真实性质，不是为了强加自己的希望。甚至早在1980年代和1990年代初，宇宙为什么应该平坦的论证刚提出时，我从事观测的朋友仍然倾向于证明相反的结论。毕竟，在科学界，争取最大影响（经常是头条新闻）的方法不是追随，而是反对创新者。

虽然如此，数据仍然有最后的发言权。根据我们的测量，可观测宇宙接近于平坦。星系根据哈勃常数膨胀，重力能为零——无论你高兴不高兴。

我现在想要说：宇宙无中生有，宇宙平坦，所有物体总牛顿重力能为零，恰好不出我们所料。争论有点难以捉摸，比我关于这个问题的通俗讲座更微妙。因此，我庆幸好歹还有个宇宙可供密切观测。

首先，我要明确这里讨论的“无物”是什么概念。这是最简单的版本，又称真空。此刻，我假设空间存在、空无一物，物理定律仍然适用。我又一次意识到：真空不断重新定义，随便什么科学概念都会捅马蜂窝。不过，我怀疑：柏拉图和阿奎纳考虑宇宙为什么

有物而非虚空时，心目中的虚空概念可能非常接近于真空。

我们在第六章已经看到：艾伦·古斯精确地解释了宇宙如何无中生有——终极免费午餐。即使不存在任何物质和辐射，真空能量也不一定为零。广义相对论告诉我们：空间会自发膨胀。因此，即使宇宙早期的极小区域都可以迅速膨胀，超过今天整个可见宇宙的范围。

我也在该章描述过：在迅速膨胀期间，即使真空能量随着宇宙一起膨胀，最终组成我们宇宙的区域还是会不断膨胀。这种现象无须任何法术或奇迹的干预。这种“负压”意味着：随着宇宙膨胀，膨胀剩余能转化为空间，而非相反。

根据这样的图景，暴涨结束时，真空储存的能量转化为真正的粒子和辐射能，实际上创造了可以追溯的宇宙膨胀开端——大爆炸。我说可以追溯的开端，因为暴涨有效地抹平了此前宇宙状态的一切记忆。初始大尺度（如果最初的宇宙前体非常大，甚至无穷大）的各向异性和复杂性得以抹平，或是逐出今天的视界外。充分暴涨后，我们就会一直观测到几乎平坦的宇宙。

我说几乎一致，因为我也在第六章描述过：量子力学总是留有剩余，是暴涨以来冻结的小密度波动。暴涨在一瞬间就产生了这样的结果，量子力学的规律产生了真空小密度波动。真空小密度波动后来产生了今天可观测宇宙的所有结构。因此，我们和我们所见的一切都源于量子波动。在近乎开端的时间，也就是暴涨期间，量子波动一定来自空无。

一切尘埃落定以后，物质和辐射的一般性结构实质上是平坦宇宙，所有物体的平均牛顿重力能表现为零。除非仔细调节膨胀值，情况将会始终如此。

因此，我们可观测的宇宙可能始于显微尺度的微小空间。后者必然是虚空，持续膨胀为大尺度，最终包含了大量物质和能量。这些物质和能量产生了我们今天所见的万物，没有消耗丝毫能量！

在第六章探讨的宇宙膨胀动力学，有一个重点值得强调：真空确实无中生有，因为有重力就有真空能。我们发现自然基本规律以前，不可能根据常识发现。

但从没有人说过：宇宙受到我们这个微不足道的时空角落引导。先验地想象：真空不会自发产生物质，似乎有道理。因此，在这个意义上，无中不能生有。但我们加入重力动力学和量子力学以后，发现常识不再可靠。这就是科学之美，没有威胁性。科学就是：我们必须修改认识、适应宇宙，而不是相反。

由此总结：今天观测到宇宙平坦、局部牛顿重力能为零，有力地暗示着：我们的宇宙源于类似暴涨的进程。在这个过程中，真空能量（无）转化为物质能量。在此期间，宇宙在所有可观测尺度上越来越接近于平坦。

暴涨证明真空如何具有能量，足以创造我们所见的万物，以及不可思议的、广大平坦的宇宙。真空并非突然具有能量，驱使宇宙膨胀的能量确实源于虚空。在这幅图景中，人们必须假设空间存在、空间蕴含能量，可以用广义相对论这样的物理定律计算其结果。因此，如果我们到此为止，人们就可以理直气壮地宣称：现代科学的无中生有论还言之过早。不过，这仅仅是第一步。随着理解不断深入，我们随后就会发现：暴涨只是宇宙无中生有的冰山一角。

第十章　虚空不稳定

即使天崩地裂，也要实现公正。

——古代罗马格言

真空存在能量，这个发现动摇了我们的整个宇宙学。同样如前所述，暴涨的基本观念只加强了已有实验依据的量子规律。真空复杂难解，孕育着生生灭灭、寿命短促的虚拟粒子。我们无法直接观测。

虚拟粒子证明了量子体系的基本特性。量子力学有一条核心规则：只要没有人看见，任何事情都可能发生。政治家和 CEO 往往符合这条规则。系统不断跃迁于所有可能存在的瞬间态之间，如果实际测量，有些态就不能存在。这些“量子波动”提示了量子世界的许多基本性质：虚空不稳定。无中总是生有，即使仅仅片刻。

但这里有问题。能量守恒定律告诉我们：量子系统挪用能量只有这么久。量子系统波动像挪用公款的股票经纪人一样，如果从真空借用一些能量，必须在短时间内归还。因此，测量系统发现不了。

结果，你可以放心地假设：量子波动无中生有的产物不过弹指一挥间，无法测量，不像你我和我们生活的地球。但这种瞬间的创造受到测量条件的约束。例如，带电物体会产生电场。这确实是真的。你能感觉到头发上的静电，或是看到气球粘在墙上。不过，电磁量子理论暗示：静电场源于带电粒子的发射，产生的虚拟光子必然能量为零。这些虚拟粒子能量为零，因此穿过宇宙不会消失。许多粒子的电场叠加，因此容易探测。

情况往往是：这样的大质量粒子确实从真空中无中生有。例如，

两块电板相互接触。只要二者之间的电场足够强，就非常有利于真正的粒子－反粒子对从真空中冒出。阳粒子向阴极板移动，阴粒子向阳极板移动。减少两块电板的电荷，产生的能量可能就会减少。因此，二者之间的电场可能大于两种粒子其余质量的相关能量。当然，如果这种情况成为可能，则电场的能量必须足够大。

实际上，另一种强场允许上述类似现象发生——但这一次是由于重力。1974 年，著名物理学家斯蒂芬·霍金（Stephen Hawking）意识到这一点，显示黑洞实际上会辐射物理粒子。如果不考虑量子力学，就永远不会有任何东西能够逃离黑洞。

许多不同方法可以理解这种情况，但通过电场理解上述情况最为契合。黑洞中心周围有一道圆径，称为“事件视界”。经典力学认为：事件视界内的物体不可能逃出黑洞，因为逃逸速度必须超过光速。因此，即使区域内的光线都不可能逸出事件视界。

现在，想象一下：事件视界外的真空产生量子波动，冒出粒子－反粒子对。很有可能，一个粒子落入事件视界。在落入黑洞的过程中，粒子失去了足够的重力能，因此，这种能量 2 倍于两个粒子的静止质量。这意味着对偶的另一个粒子可以飞向无穷远，可以观测而无须破坏能量守恒。辐射粒子有关的所有正能量抵消了对偶粒子落入黑洞的能量损失。由此，黑洞能够辐射粒子。

不过，情况甚至更有趣，因为下落粒子的能量损失其实超过了静止质量的正能量。结果，粒子落入黑洞后，黑洞的能量反而会减少！因此，粒子落入后，黑洞变得更轻，程度相当于辐射粒子带走的能量。最后，黑洞可能辐射殆尽。我们不了解黑洞的最后时刻，因为广义相对论不能适用于黑洞蒸发末期的短距物理学。在这些尺度上，重力必须完全适用量子力学理论。我们目前对广义相对论的理解不足以精确判断发生的事情。

虽然如此，所有这些情况都暗示：只要条件合适，无中不仅可以生有，而且必然生有。

虚空不稳定而产生物质。据我所知，这方面的第一个宇宙学实例源于以下的努力：理解我们为什么会生活在物质宇宙。

你每天早上起来，大概不会为此疑惑。但事实是：我们的宇宙包含物质，本身就很不寻常。宇宙中没有大量的反物质，尤其值得注意。不要忘记，量子力学和相对论需要反物质存在。因此，据我们所知：自然界所有粒子都有相应的反粒子，电荷相反、质量相同。可以设想：任何一种合理的宇宙一开始都含有同等数量的物质和反物质。毕竟，普通粒子的反粒子有同样的质量和相似的其他特性。如果早期宇宙能产生粒子，就能同样轻易地产生反粒子。

作为选择，我们甚至能够想象一种反物质宇宙，组成星体和星系的所有粒子都由反粒子取代。这种宇宙的特性几乎跟我们的宇宙一模一样。这种宇宙的观察者（他们自己就由反物质组成）无疑会称我们所谓的反物质为物质。名字怎么样都行。

当然，如果宇宙一开始有等量的物质和反物质，而且始终如此，我们就不会有机会问“为什么”和“怎么会”了。这是因为所有物质粒子和反物质粒子已经在宇宙早期湮灭，只剩下纯粹的辐射。没有留下物质或反物质组成星体或星系、情人或反情人。他们不会有朝一日在彼此的怀抱中惊叹夜空的奇观。没有戏剧性事件。历史一片空白。沐浴宇宙的辐射慢慢冷却，宇宙最后变得寒冷、黑暗、空虚。虚无君临一切。

不过，在 1970 年代，科学家开始理解：在灼热的大爆炸早期，物质和反物质可能数量相当。“无中生有”的量子机制引起了微小的不对称，宇宙早期物质稍微超过反物质。然后，物质和反物质没有完全湮灭，只留下纯粹的辐射。所有早期反物质跟物质湮灭。少量多余物质没有对应的反物质，保留下来，产生了所有物质。这些物质组成了我们在今天宇宙中见到的星体和星系。

因此，这个小小的成就（早期的微小不对称）几乎可以视为创世时刻。原因在于：一旦物质和反物质形成对称，以后就再也无法

让它们分离。一定要保证充满星体和星系的宇宙未来。反粒子要在宇宙早期跟物质粒子湮灭，多余的物质粒子幸存到今天，奠定了我们了解、热爱、栖息的可见宇宙特征。

即使十亿分之一的不对称，也足以留下足够的物质，产生我们今天所见的宇宙万物。事实上，十亿分之一的不对称可能恰到好处，因为今天宇宙微波背景辐射中每十亿个光子就对应宇宙中一个质子。在这种图景中，宇宙微波背景辐射的光子是接近时间起点时，物质和反物质相互湮灭的遗留。

这一过程在早期宇宙如何发生，缺乏清楚的描述，因为我们还没有完全确定微观物理学世界的经验性细节。不对称大概是在这个尺度上形成的。虽然如此，我们依据目前最好的微观物理学观念，已经探索了一系列似乎可靠的不同场景。它们的一般特性相同，只是细节有差异。在原初热浴槽中，基本粒子相关的量子进程可以无情地驱动一个几乎空空如也的宇宙（等价于物质和反物质对称的原初宇宙），变成一个物质和反物质主导的宇宙。

如果两种方式都有可能，那么，我们的宇宙由物质主导，是不是纯属偶然？设想你站在山顶上跳开。你跳开的方向事先并没有确定，取决于你视线的方向和起跳的地点，纯属偶然。或许，我们的宇宙也是这样。即使物理定律已经确定，物质和反物质不对称的最终方向仍然取决于某些随机初始条件。（就像从山上往下跳。重力定律是确定的，决定你一定会下落，但下落的方向可能是偶然的。）又一次，在这种情况下，我们的存在只是环境造成的偶然事件。

不过，值得注意的是：物理学基本定律有一个特性，允许量子进程驱使宇宙远离无特征状态，不受这种不确定性的影响。物理学家弗兰克·维尔切克（Frank A. Wilczek）是第一批探讨这些可能性的理论家之一。他提醒我说：他 1980 年在《科学美国人》（*Scientific American*）杂志上发表过一篇文章，论述物质和反物质的不对称性，恰好就用了本章前面的语言。他首先叙述：根据

我们对粒子物理学的新理解，早期宇宙可能合理地产生物质和反物质的不对称性，然后又补充了一个注释：为什么无中生有，这就是一种解答的思路。虚空不稳定。

弗兰克所说的不稳定性概念非常专业化，涉及的事实是：物理定律可能自然促使物质和反物质对称的宇宙产生小幅偏离，但中心要点是：这种不稳定性是量子宇宙的一般性特征。正如我现在的描述：我们在这里探讨的问题不仅涉及我们宇宙的粒子和场，还涉及宇宙整体本身。

不过，我继续讨论之前，首先要回顾下面的相似性。我刚才讨论了物质和反物质的对称性。我们的起源研究小组最近在探讨我们当前对宇宙生命本质及其起源的理解，二者颇为相似。措辞有所不同，但基本内容极其相似。地球早期有什么特殊的物理进程，可以导致第一批自我复制的生物分子和新陈代谢机制产生？像 1970 年代的物理学一样，生物学在最近 10 年间突飞猛进。例如，我们理解了天然有机物在大致可信条件下产生的途径。长期以来，人们认为 RNA 是现代 DNA 世界的前驱。人们直到最近才觉得：这种直接途径不可能，某些其他的中间形式一定发挥了关键性作用。

虽然专家还没有发现生命起源的过程，现在几乎没有几个生物化学家和分子生物学家还会怀疑：生命从无生命物质中自然起源。不过，如前所论，我们的会议贯穿了一种共同的潜台词：地球第一批生命是不是一定有这种化学过程？或者存在许多不同，但同样可行的可能性？

爱因斯坦曾经提过一个问题。他说：关于自然界，他真正就想理解一件事。我承认：这是最深刻、最基本的问题，我们许多人都想回答。他的问题是："我想知道：上帝创造宇宙时，有没有其他选择？"

我补充注解，因为爱因斯坦的上帝不等于《圣经》的上帝。对爱因斯坦而言，宇宙的存在秩序提供了一种深刻的敬畏感。他对此

怀有精神上的依恋，在斯宾诺莎（Spinoza）的激励下，称之为“上帝”。无论如何，爱因斯坦在这个问题上的真正意思就是我刚才在几个不同事例中描述的内容。自然法则是不是独一无二的？我们所在的宇宙是不是这些法则独一无二的产物？你如果改变一个面相、一个常数、一种力，无论多么轻微，会不会导致整个大厦的崩溃？我们在宇宙中是不是独一无二？我们会在本书后面的地方回来探讨这个重要问题。

这种探讨能让我们进一步精炼和概括“无”和“有”的概念。我想回顾中间步骤，这个步骤使无中生有不可避免。

我迄今为止的定义是：“无”相应源于我们观测的“真空”。只要我们能整合量子力学和广义相对论，就能扩大论证范围，包括空间自身的生成。

广义相对论作为重力理论，以时空理论为核心。我在本书第一页说过：这意味着它是第一种理论，不仅阐述空间内物体的运动，而且阐述空间本身的演化。

因此，量子重力理论意味着量子力学法则适用于空间特性，不像传统量子力学那样，仅仅适用于空间内物体的特性。

足智多谋，但形式严谨的物理学家理查德·费曼扩大量子力学范围，容纳了这种可能性。他非常适合这种任务，完成了反粒子起源的现代理解。费曼的方法集中于我在本章开头提及的关键事实：量子力学探讨时间演进中所有可能的路径，包括经典力学禁止的路径。

费曼为了解释这一点，发展了“路径积分”为预测手段。我们运用这种方法，可以考虑粒子在两点之间所有可能的轨迹。然后，我们根据精确定义的量子力学原理，分配每一种轨迹的可能性。接下来，我们用路径积分预测粒子运动的最终可能性。

斯蒂芬·霍金是充分运用这种概念的第一批科学家。他探讨时空量子力学（整合我们的三维空间和一维时间，形成爱因斯坦广义

相对论要求的四维时空连续体）。费曼方法的优点是：每一条路径每一点都有各自的时空类型，他的积分法集中所有路径终点，结果不依赖于任何特定时空类型。相对论告诉我们：在相对运动中，不同观察者测量的距离和时间各不相同。因此，时空每一点都有不同的数值。这种体系不依赖不同观察者对时空每一点的分类，因此特别有用。

广义相对论的时空分类纯属武断，因此，不同观察者在重力场不同位置测量时间和距离，结果不同。系统全部运作最终取决于空间几何特性，例如曲率，不依赖于任何特定时空类型。

我几次提到：至少就我们所知，广义相对论和量子力学并不完全相容。因此，在广义相对论中，费曼的路径积分技术不可能完全清楚地定义。因此，我们只能依据盖然性预先猜测一二、核对结果是否有意义。

如果我们考虑时空量子力学，就必须想象：在费曼的“积分”中，每一种可能的布局都需要考虑。量子不确定性君临一切时，这些布局在任何进程的中间阶段体现不同的空间几何特征。这意味着我们必须考虑：在短时间、短距离内，空间任意高度弯曲。（时间距离极短，以致无法测量。因此，量子奇异性可以自由展布。）由此，经典观察者在大尺度上无法观测这些奇异的布局，我们在大尺度时间和距离上，同样无法测量空间特性。

不过，我们甚至要考虑更奇怪的可能性。不要忘记：在量子电磁理论中，粒子可以随意从真空中冒出，只要他们在测不准原理决定的时间框架内消失就行。而后，费曼的量子积分覆盖所有可能的时空布局。人们是否应该考虑紧凑小宇宙生生灭灭的可能性？更普遍的是：空间可能有“洞”或“把手”，就像扣入时空的甜甜圈，这样的空间应该怎么办？

这些问题还悬而未决。不过，除非有充分理由排除量子力学产生的布局，那么，根据大自然普遍适用的一般性原理（也就是说：

只要物理定律未曾禁止，就一定会发生。），似乎更有理由考虑这些可能性。量子力学决定了宇宙演化的特性。

正如斯蒂芬·霍金以前的强调，量子重力理论允许空间无中生有，即使生命短促。他没有在科学著作中宣扬“无中生有”之谜，量子重力理论最后有效地实现了这一点。

“虚拟”宇宙的理论构架非常迷人，但它们解释无中生有，仍然不过是：原来的真空产生虚拟粒子。换句话说：在我们无法直接测量的短促时间尺度上，紧凑的小宇宙不断生生灭灭。

不过，回顾真正非零的电场：带电粒子在大尺度上无法观测。连续输出许多虚拟零能量光子，就能产生这样的电场。原因在于：虚拟零能量光子的输出不会破坏能量守恒定律。它们存在时间极短，随即重新被吸收、消失，因此不受海森堡测不准原理的约束。（再提醒一下：海森堡测不准原理描述我们测量粒子能量的不确定性。因此，发射和吸收虚拟粒子，可以轻微改变能量，与观测时间成反比。因此，没有携带能量的虚拟粒子本来就可以任意行动。也就是说：它们重新被吸收以前，可以在任意时间、距离上出没……可能导致远程带电粒子的相互作用。如果光子没有质量，总是带走静止质量产生的非零能量，海森堡测不准原理就意味着电场寿命短促，因为光子活动时间短暂，很快就被重新吸收。）

类似的论证提出，人们可以想象：由于测不准原理和能量守恒定律的限制，特殊类型的宇宙可能自发出现，无须消失。换句话说，一个紧凑的宇宙具有零能量。

现在，关于我们所在的宇宙，我没有更好的提议了。提议很容易，但我在这里更关心我们目前对宇宙的理解，而不是提出明显容易而可信的无中生有例证。

我已经论证过：在我们的平坦宇宙中，所有物体的平均牛顿重力能为零。我希望论证很有说服力。确实是这样，但这不是全部情况。重力能不是任何物体的总能量，我们必须把静止能量加上去，

静止能量跟静止质量有关。换句话说，如前所述：静止物体如果跟所有其他物体距离无限大，其重力能就等于零。原因在于：如果它静止，就没有动能。如果它距离其他粒子无限远，势能也必然等于零，因为势能源于其他粒子的重力作用。不过，正如爱因斯坦所说：总能量不仅源于重力，还包括跟质量有关的能量。这就是众所周知的 $E=mc^2$。

我们为了考虑其余的能量，必须从牛顿力学转向爱因斯坦广义相对论。根据定义，广义相对论将狭义相对论（和 $E=mc^2$）的效果吸纳到重力理论中。在这里，情况变得更微妙、更混乱。在小尺度上对比宇宙的可能曲率，只要所有物体在这些尺度上的移动速度比光速慢，广义相对论的能量版本就转化为我们熟悉的牛顿体系。不过，一旦这些条件不复存在，原来的预测就失去了大部分意义。

部分问题在于，事实证明：在大尺度弯曲宇宙中，物理学其他地方的能量概念并不完善。不同观察者定义坐标系、描述不同分类的方法各不相同。于是，在大尺度上，不同时空位置（称之为不同“参照系”）可以决定不同的系统总能量。我们为了容纳这种效果，必须泛化能量概念。而且，如果我们规定任何宇宙的总能量，就必须考虑如何增加宇宙能量。宇宙在空间尺度上无穷大。

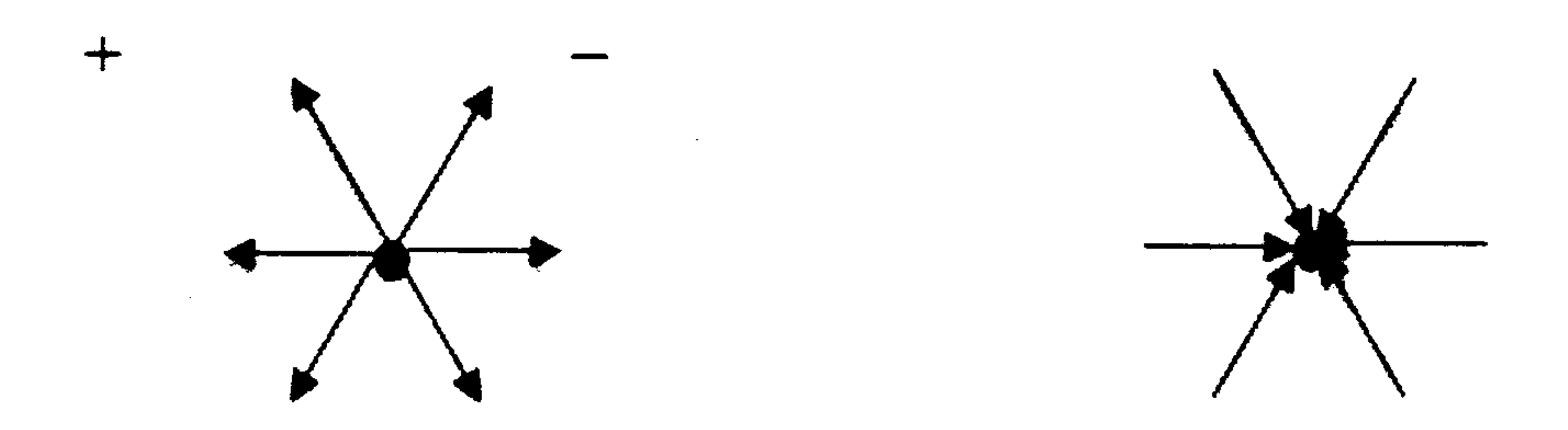
如何精确地做到这一点，存在许多争论。科学文献充满了这方面的论断与反驳。

不过，有一件事可以肯定：一个宇宙的总能量肯定精确为零。无论宇宙如何平坦，空间上大体无限。因此，总能量的计算问题重重。这是一个闭合宇宙，物质和能量密度足以导致空间重新闭合。如前所述：在闭合宇宙中，如果你向某一个方向看得足够远，最后就会看到自己的后脑勺！

闭合宇宙能量为零的原因实际上非常简单。类推很容易得出结果，而且，闭合宇宙的总电荷也一定等于零。

我们从迈克尔·法拉第（Michael Faraday）时代以来，就认

为电荷是电场的来源（现代量子理论归因于我前面描述的虚拟光子发射）。我们借助绘图想象："电场线"呈放射状，从电荷发出。电场线的数目与电荷成正比。正电荷向外，负电荷向内。如图所示：



我们设想：这些电场线向外伸向无穷，它们延伸得越远，就分离得越远。这意味着电场的力量越来越弱。不过，在闭合宇宙中，正电荷的电场线一开始向外延伸，最后会像地球经线在南北极会合一样，在宇宙远侧重新会合。电场线会合后，电场又变得越来越强，直到有足够的能量产生负电荷，在宇宙对跖点上"吃掉"电场线。

事实证明：电场线在这种情况下与能量在闭合宇宙中，情况非常相似。不过，前者与"流量"无关。后者告诉我们：正能量包括静止质量相关能量，负能量源于重力能，正负能量相互抵消，因此总能量恰好等于零。

因此，如果闭合宇宙总能量为零、量子重力路径积分值合适，那么宇宙在量子机制下表现为无中生有，没有携带静能量。我要强调：这些宇宙自身包括完整的时空，跟我们的宇宙完全分离。

不过，这里有一个问题。充满物质的闭合膨胀宇宙通常会扩张到最大极限，然后同样迅速地重新塌缩，结束于时空奇异性。目前，时空奇异性是量子重力的荒野，终极事实无人得知。因此，典型微闭合宇宙寿命短促，或许类似"普朗克时间"（Planck time）的数量级。普朗克时间是典型的量子重力时间尺度，大约10-44秒左右。

不过，有一种方法可以摆脱两难处境。如果在这样的宇宙塌缩前，宇宙场分布产生了一个暴涨时期，那么，甚至最初的微闭合宇宙也

能迅速地指数膨胀，在暴涨期间不断接近无穷大平坦宇宙。宇宙经过暴涨 100 倍或 2 倍时间后，就会极其平坦，很容易比我们的宇宙寿命更长，而且没有塌缩之虞。

另一种实际存在的可能性总是让我带来轻微的怀旧(和羡慕)感，因为对我而言，它代表一段重要的学习经验。我一开始在哈佛大学做博士后，玩各种可能的重力场量子力学。我从研究所的好友伊安·阿弗莱克（Ian Affleck）处得到一个答案。阿弗莱克加入学术圈比我早好几年，像我现在一样运用费曼数学理论处理基本粒子和场，称为量子场论，计算粒子和反粒子怎样在强电场中产生。

我明白，伊安的答案是某种形式的“瞬子”。他的体系如果用于重力，就酷似暴涨宇宙。而且它像暴涨宇宙一样，无中生有！我首先讲自己用数学解释物理学的困惑，然后再宣扬他的结果。我不久就发现：无论怎么构思，都会落在天才物理学家亚历克斯·维棱肯后面。我前面提到过他，后来我们交上了朋友。事实上，维棱肯刚刚写了一篇论文，内容是量子重力如何无中生有，创造暴涨宇宙。我让他抢先了一步，但心悦诚服，因为：1. 我确实没有弄懂工作的细节。2. 亚历克斯大胆提出了我当时不敢提的内容。我从此学到：必须首先理解论文的一切意义，然后才能发表。确实，我最重要的几篇论文都是在充分理解事实后才发表的。

无论如何，斯蒂芬·霍金及其同事吉姆·哈特尔（Jim Hartle）提出的方案非常不同。他们试图判断宇宙无中生有的“边界条件”，重要的事实如下：

1. 根据量子重力理论，宇宙能够，而且一直自发地无中生有。这种宇宙无须虚空，只要总能量为零（包括与引力有关的负能量），就能够存在物质和辐射。

2. 这种机制可以创造闭合宇宙。为了让闭合宇宙的寿命超过显微时间，暴涨这一类现象有必要存在。因此，只

有长寿的宇宙才可能像我们今天所在的宇宙这样平坦。

结论很清楚：看来量子力学不仅允许宇宙无中生有，甚至需要宇宙无中生有。我强调：在这种情况下，“无”的意思是：不存在时间、空间和一切！“无”是不稳定的。

而且，如果宇宙的一般特性长期持续，我们今天观测宇宙，就有希望看到它们。

这能证明我们的宇宙无中生有吗？当然不能。但我们由此向这种可信的场面接近了一大步。前一章提到无中生有，它移去了反对无中生有的一大障碍。

在这里，“虚空”意味着空空如也，但早已存在的空间，以及确定的已知物理定律。现在已经不需要空间了。

不过，值得注意的是：我们接下来就要讨论，甚至物理定律都可能不是必要或必需的。

第十一章　奇妙新世界

这是最好的时代，这是最坏的时代。

——查尔斯·狄更斯（Charles Dickens）

创世概念的中心问题是：需要某种外因，某些先于系统、外在于系统而存在的事物，产生系统存在的条件。通常这就需要上帝的观念，因为外因的因果链总需要一个终点。上帝外在于时空，其实还外在于物理实在本身。但在我看来，这种意义的上帝只是一个方便的语义学结论，不能解答深刻的创世问题。我认为：上帝最好用于解释略有不同的事例，例如道德的起源。这是朋友斯蒂芬·平克（Steven Pinker）第一次告诉我的。

道德是外在而绝对的，还是仅仅源于生物和环境因素，因而可以科学地判断？平克在亚利桑那州立大学组织的讨论会上，指出了下面的难题：

许多虔信宗教的人论证：如果没有上帝，就没有终极的是非标准。也就是说，上帝为我们决定了是非标准。接下来，有人可能会问：如果上帝下令强奸和屠杀，道德上是否可以接受？他们应该服从吗？

有些人会说是，但我相信大多数信徒会说不：上帝不会下这样的旨意。但为什么不会？大概是上帝有理由不下这样的旨意。又一次，原因大概是强奸和屠杀在道德上不可接受。但如果上帝需要理由，为什么不干脆省去这个中间环节呢？（译者按：在神学史和哲学史上，“上帝命令亚伯拉罕［Abraham］杀子祭祀”和“惩罚义人约伯［Job］”早已是历代神义论的经典案例。列夫·舍斯托夫［Lev

Shestov］和基尔凯廓尔［Kierkegaard］的哲学著作有大量的论述。经验主义的哲学家一般认为：道德属于理性不及范围，理性自身是传统［包括道德］演化产物，不能逆推其母体。理性主义的哲学家一般将先在于［客观］道德法则归于柏拉图式终极原型——亦即彼岸性或神意。）

我们可以在宇宙创造问题上运用类似的论证。我迄今为止提出的所有事例确实都暗示诱导无中生有的创造，但创造的法则或物理定律预先已经确定。定律从何而来？

有两种可能性。一种是：上帝或某种神明不受定律约束。上帝外在于定律，随心所欲或胸有成算地决定定律。另一种是：定律产生于不那么超自然的机制。

上帝决定自然法则的问题是：你可以问，上帝的法则由谁或由什么决定。传统的答案是造物主上帝还有许多惊人的属性：罗马天主教会称之为“一切原因的原因”或“第一因”（阿奎纳），亚里士多德（Aristotle）称之为“第一推动力”。

有趣的是：亚里士多德认识到第一因问题，断定宇宙的第一因必定是永恒的。而且，他将上帝定义为“第一推动力”，本身必然是永恒的。上帝引起运动，不是通过创造，而是通过确定运动的终极目的。亚里士多德认为终极目的必然是永恒的。

亚里士多德觉得：将第一因等同于上帝，并不能令人满意。事实上，柏拉图的第一因概念有缺陷，尤其是，亚里士多德觉得：所有因都有前因——因此宇宙必然是永恒的。如果选择上帝为一切原因的原因，即使宇宙不是永恒，归谬法也足以结束“为什么”的问题。不过，我已经强调过，这样的代价是：没有任何其他证据，就引入了全能的实体。

在这方面，还有另一个要点需要强调。第一因表面上是逻辑需要，其实却提出了一个真正的论断：任何宇宙都有开端。因此，仅仅在逻辑基础上就无法排除自然神论的观点。不过，即使在这种情况下，

认识到下面的事实也是至关重要的。这种神明跟世界各大宗教的人格神没有关系，虽然后者经常以前者为辩护理据。神明以包罗万象的智慧奠定自然秩序，通常不会跟《圣经》受同一种逻辑驱使。

几千年来，智者和非智者争辩、讨论这些问题，后者往往以此谋生。我们现在可以回顾这些问题，因为我们对物理实在的理解有所进步。亚里士多德和阿奎纳都不知道星系的存在，更不用说大爆炸和量子力学。因此，新知识可以解释和理解他们和后来中世纪哲学家聚讼不已的问题。

例如，现代宇宙学认为：亚里士多德提出的第一因不存在。或者不如说：原因可以向所有方向前后延伸到无穷远。没有开端，没有创世，没有终结。

迄今为止，我一直在描述无中如何生有。我集中注意：先在真空无中生有，或是根本没有空间的地方创造真空。我考虑“虚无”时，两种初始条件都包括在内，都有候选资格。不过，我没有直接探讨创世前可能存在的内容，创世遵循的物理定律。或者说，我通常不讨论第一因问题。简单的答案是：真空和产生真空的更基础虚无是先在和永恒的。不过，公平地说：提出可能的问题，不一定有答案。创世遵循的定律大概就是这一类的定理。

不过，有一件事可以肯定：形而上学意义上的法则“无中不能生有”在科学上没有依据。我在创世问题上跟这些坚定的支持者争论过。这些人坚定、自信、不容反驳，跟他们争论就是错误。达尔文提出生命起源理论时，就犯过这样的错误。他逾越了科学的范围，根据类推，错误地声称物质不可能创造或毁灭。所有这一切都说明，他们不愿意承认一个简单的事实：大自然比神学家和哲学家更聪明。

而且，这些人似乎一面坚持无中不能生有，一面又完全同意堂吉诃德式观念：上帝四处奔走，维系宇宙。不过，事情还是这样：如果有人主张，真正的空无甚至不能包括存在的潜能，那么上帝肯定也无法创造奇迹。上帝无中生有，因此无中一定有存在的潜能。

简而言之：超自然潜能就是上帝能做、自然不能做的存在，多多少少不同于自然法则的存在潜能。但这样一来，空无一词就变成随心所欲的语义学游戏。他们藉以预先确定（不出所料，神学家总是这样）：超自然（及上帝）必须存在。他们籍以确定哲学理念（还是完全没有经验基础）：排除上帝以外的任何可能性。

无论如何，上帝的假设可以解决这个难题。迄今为止，我已经强调了许多次。经常有人主张：上帝存在于宇宙之外，不受时间束缚，或是永恒不朽。

我会提出：当代对宇宙的理解提供了另一种答案，在物理学意义上更有说服力，具有外在造物主的某些同样特征，而且逻辑上更协调。

我这里指的是多重宇宙。宇宙的数目可能无穷无尽、各有特色，彼此没有因果联系，我们的宇宙可能是其中之一。各宇宙的物理实在各有不同的基本特征。这种概念提供了理解我们宇宙的广阔新可能。

如前所述，物理学在某些基本层面上，很可能只是环境造成的科学。这幅图景最让人讨厌，却有潜在的真实性。（我讨厌这种观念，因为我受到的教育是：科学的目的是解释宇宙为什么会这样，怎么变成这样的。如果物理定律仅仅是一些有关存在的偶然事件，基本目的就错了。不过，只要事实证明这种观念正确，我能克服偏见。）在这种情况下，基本自然力和常数并不比地球和太阳的距离更基本。我们发现自己生活在地球上，而不是火星上，并不是因为地球和太阳的距离有某些深刻的基本意义，仅仅是因为：如果地球和太阳的距离不一样，我们所知的生命就不可能在地球上产生。

这些人择原理模棱两可、臭名昭著。如果没有清楚地了解所有可能宇宙的分布和我们在宇宙中的“典型”程度，几乎不可能依据人择原理做出预测。各宇宙的基本常数和基本力各不相同，也就是说，数值和形式变化很大。如果我们不是“典型”的生命形式，人

择原理即使生效，依据的因素也将面目全非。

多重宇宙中要么是宇宙景观存在额外维度，要么是三维空间在永恒暴涨下无限复制。我们的宇宙创生时，暴涨改变了必需的条件和场域。

在第一种情况下，自然法则允许我们的宇宙形成和演变。是什么决定了自然法则，意义已经不大。如果自然法则本身就是随机形成，我们的宇宙就不会有确定的“原因”。一般性法则没有禁止的事物都是允许的，因此我们可以放心，总会有一些宇宙产生我们发现的自然法则。保持自然法则的本色，不需要任何机制或实体。它们可以随便怎样。我们现在没有基本理论解释多重宇宙的细节，因此无话可说。（不过为了公平起见，方便计算概率的科学进步，我们通常设想：量子力学这样的特性无所不在。我不知道，这种观点是不是无须建设性成果就能有用，至少，我没有见过这方面的成果。）

事实上，可能根本没有什么基本定律。虽然我是物理学家，希望这样一种理论存在。我希望有朝一日能对此有所贡献。但令人遗憾，如前所述，希望可能落空。我从理查德·费曼的陈述中获得安慰，本书结尾以他的引文为开端。我以前简要总结过，在这里全文引用：

> 人们对我说：“你是不是在寻找终极物理定律？”不，我没有。我只是追求更多地认识世界。如果事实证明：简洁的终极法则能够解释一切，那好。发现了就好。如果事实证明：物理定律像百万层洋葱皮，我们一层层剥得不耐烦了，那就随便……我对科学的兴趣仅仅是：追求更多地认识世界。越多越好。我喜欢发现。

论证可以推向更远的、不同的方向，本书论证的核心也是这样。在前面探讨的所有各类多重宇宙中，可能存在无穷多区域，包括无穷大和无穷小、“无”与“有”。在这种情况下，回答“为什么有物，

而不是空无”，纯属陈词滥调。答案其实很简单：如果宇宙是空无，就不会有我们！

我承认：用这样琐屑的答案回答源远流长的深刻问题，其实就是认输。但科学告诉我们：任何深刻或琐屑的事物都可能跟第一印象大相径庭。

宇宙的奇异与丰富，远远超过人类微弱的想象力所能及，堪称光怪陆离。现代宇宙学迫使我们考虑100年前不可能形成的想法。20世纪和21世纪的伟大发现不仅改变了我们经营的世界，而且给我们的观念带来了革命性变化。存在和可能存在的单一和多重世界近在咫尺，实在隐藏于其中，只要我们有勇气，就能发现。

哲学和神学终归没有能力解决困扰我们的存在问题，原因就在这里。我们睁开眼睛，让大自然发号施令以前，只能沉湎于狭隘的视野中。

宇宙为什么有物，而不是空无？从根本上讲，这个问题并不比“为什么有的花红，有的花蓝？”更深刻、更有意义。无中总是可能生有。这可能是必须的，独立于实在的基本性质。或许，在多重宇宙中，“有”并不特殊，而是非常普遍。真正有用的方法不是沉思默想，而是加入令人兴奋的发现之旅。这样才能揭示：演化出我们生命的宇宙、最终支配我们生存的自然进程，到底有多么特殊。我们可以用思索补充理解，称之为哲学。但我们只有不断探索宇宙每一个可以接近的角落，才能真正理解自己在宇宙中的位置。

我得出结论以前，想提出这个问题的另一个方面。我以前还没有提及这方面，但兴趣很大，值得在结尾提出。宇宙为什么有物，而不是空无？提出这个问题，就隐含期待：“有物”状态会延续

下去。宇宙演进到我们目前这一点，仿佛我们就是创造的小高峰。更有可能，根据我们对宇宙的一切了解：在无穷的未来，“虚空”会一再卷土重来。

如果我们的宇宙受真空能支配，如前所述，未来确实非常惨淡。天空将会变得寒冷、黯淡、空虚。而且，情况还会江河日下。真空能支配的宇宙前途最为可悲。在这样的宇宙中，任何文明都将灰飞烟灭、丧失维系的能量。经过深不可测的漫长时间后，量子波动或热扰动可能再度产生地方性区域，生命可以在这里演化和繁荣。但这种文明朝生暮死、寿命短促。未来的宇宙一片空虚，无人能够领会其深邃的神秘。

相反，如果量子进程在时间开始时创造了组成我们的物质，我们实际上注定会消失。物理进程有双向性，开端和结束相互联系。在遥远的未来，质子和中子会崩溃，物质会消失，宇宙会接近于最大的简单和对称。

或许，数学美缺乏实质。以弗所（Ephesus）的赫拉克利特（Heraclitus）用略有不同的措辞写道：“荷马（Homer）说：‘但愿诸神和人类不再起纠纷！’这是大错特错。他没有看到，他是在祈祷宇宙的毁灭。如果他的祈祷实现，一切都完了。”克里斯多弗·希金斯一语中的：“涅槃就是虚无。”

最终堕入虚无的更极端版本可能无法避免。有些弦理论家主张：根据复杂的数学，我们这样的宇宙有真空正能量，不可能稳定。最后，它一定会塌缩为真空负能量状态。那时，我们的宇宙将会内向塌缩，回到存在开始时的量子云雾状态。如果这些论证正确，我们的宇宙将会突然消失，正如它突然出现。

在这方面，“宇宙为什么有物，而不是空无？”问题的答案就会很简单：因为它们不会长存。

后 记

文艺复兴以来，
我们文明的主要动力
和意义深远的主题，就是：
将经验事实的支持视为真理的面孔。

——雅各布·布朗诺夫斯基

本书开始时，我引用了布朗诺夫斯基另一段话：

无论美梦还是噩梦，我们都要清醒地体验。在我们生活的世界上，科学无孔不入。科学完整而又真实。我们不能无视科学，犹如对待游戏。

我也提到过：一人之美梦，就是他人之噩梦。有些人觉得：宇宙如果没有目的和方向，生命就毫无意义。包括我在内的其他人觉得：这样的宇宙令人振奋。我们存在的事实因此更为奇妙，促使我们从自己的行动中寻找意义。我们短暂的生涯大部分处于太阳系，就因为我们在这里，幸而有意识、有机会。不过，布朗诺夫斯基的观点是：我们到底喜欢哪一种宇宙，其实无关紧要。无论发生什么、发生过什么，都是宇宙尺度上的事件。在这个尺度上，无论发生什么，我们喜欢不喜欢都无关紧要。前者我们影响不了，后者我们不大可能影响。

不过，我们能够理解自己生存的环境。我在本书中已经描述了

人类进化史最非凡的旅程。这是探索和理解宇宙的史诗，其尺度在100年前还闻所未闻。

这次旅程拓宽了人类精神的领域，既有追随一切证据的决心，又有投身探索未知的勇气。即使明知理解可能毫无用处，也不退缩。这种冗长的工作充满无休止的方程式和实验，创造性和执着缺一不可。

我一直受到西西弗斯（Sisyphus）神话的吸引，往往将科学工作比喻为他推石上山的永恒劳作。阿尔贝·加缪（Albert Camus）想象西西弗斯在微笑，我们科学家也是。无论收获如何，我们的耕耘就是报酬。

由于过去100年的惊人进步，我们已经面临关键时刻。自从人类第一次尝试理解：他们是谁，他们从何而来，现在的科学家实际上提出了最深刻的问题。

如前所述：这些问题的意义伴随着我们对宇宙的理解，一起演进。“宇宙为什么有物，而不是空无？”只有在宇宙的环境内才能理解。这些措辞的意义已经不复当初。有和无的区别开始消失，二者在不同环境内相互转变，不仅常见，而且必要。

我们追求知识时，这个问题退出局外。相反，我们必须理解支配自然的进程，才能做出预测，在可能的时刻影响未来。

我们在探讨中发现：在我们生活的宇宙中，真空（以前曾经冒充空无）有新型力学，支配宇宙当前的演化。我们发现，所有迹象都提示：宇宙可能，而且似乎就是产生于更深刻的虚无（空间本身不存在）。有朝一日，宇宙还会重归于无。这个过程不仅可以了解，而且无须外在控制和指引。在这种意义上，正如物理学家温伯格的强调：科学并非取消相信上帝的可能性，而是产生了不信上帝的可能性。如果没有科学，一切都是奇迹。既然有了科学，就没有奇迹的容身之地。在这方面，宗教信仰越来越没有必要，而且越来越无关紧要。

当然，我们每个人都面临转向神造论的选择。我并不期待现在的争论迅速消失。但我已经说过：如果我们的选择足够诚实，就应该依据事实，而非启示来选择。

本书的目的是：根据我们的理解，提供宇宙图景，描绘当前推动物理学发展的理论推测。由此，科学家正在努力把糠从麦子中筛掉。

我已经明示了自己的偏好。在我看来，宇宙无中生有远不是当前最不寻常的另类智力成就。读者可以自己下结论。

我想用一个问题结束探讨，就是爱因斯坦提过的问题：“上帝创造宇宙时，有没有其他选择？”我个人觉得：这个问题比无中生有的问题更具智力上的魅力。这个问题提供了几乎所有基础研究的动力，包括物质、空间和时间的结构。我在自己的职业生涯中，对这些问题非常着迷。

我过去觉得答案一目了然，但在撰写本书的过程中，我改变了看法。显然，如果有统一理论包括独特的法则，确实能描绘和预测宇宙如何产生、从那时到现在支配宇宙演进的法则。自牛顿和伽利略以来，这一直是物理学的目的。那么，答案似乎应该是：没有选择余地，事情只能是这样。

但如果我们的宇宙并不是独一无二，而是浩瀚、可能无穷多重宇宙的一员，是不是就能响亮地回答爱因斯坦的问题呢？“有，选择有许多。”

我不能肯定。定律体系、基本粒子、基本物质和基本力可能有无穷多种，甚至独特的宇宙也可能产生于多重宇宙。或者，可能只有一种非常严格的组合，只能导致我们这样的宇宙或非常类似的宇宙，只有它才能支持生命进化，产生提出这种问题的生命。那么，爱因斯坦问题的答案仍然是否定的。如果上帝或自然包括多重宇宙，就能保证创造有爱因斯坦提出问题的宇宙。要么，相容的物理实在只有这一种选择。

我对这两种情况都很满意，即使表面上无所不能的上帝创造我们的宇宙时，没有自由。无疑，原因在于：这暗示上帝没有存在的必要——至多是个冗余。

跋

理查德·道金斯

扩大精神视野，莫过于宇宙膨胀。天体音乐是韵律的苗圃，应和宏伟的银河交响曲。只要改变比喻和尺度，我们称为“古代历史”的数百年尘埃不久就会被地质时代的不断侵蚀之风卷走。即使劳伦斯·克劳斯保证将宇宙年龄精确到第4位数，137亿年跟未来的上万亿年相比，仍然微不足道。

但克劳斯对宇宙遥远未来的看法既矛盾又恐怖。科学进步不大可能走向反面。我们自然会想：如果公元2万亿年后有宇宙学家，他们的宇宙观应该比我们更广阔。不像本书——我搁笔时只留下一批零散的结论。增减几十亿年，就能适合宇宙学家的需要。2万亿年以后，宇宙膨胀变本加厉，除了宇宙学家的星系（无论是哪一个），各星系都已经消失在爱因斯坦绝对视界后。视界如此绝对，不可侵犯，因此它们不仅看不见，而且没有留下一点可以探索的痕迹，即使是间接痕迹。它们有可能从不存在。大爆炸的遗迹大部分已经永远消失，不可能恢复。未来宇宙学家不像我们，跟过去和四周的联系都已经切断。

我们知道四周有上千亿星系，知道大爆炸，因为证据就在我们四周。遥远星系的红移辐射告诉我们哈勃膨胀的存在，我们可以逆推。我们享有验证的特权，因为我们的宇宙还在婴儿时期。我们如果回溯宇宙的黎明时期，那时光线仍然可以在星系之间旅行。克劳

斯及其同事机智地说："我们的时代非常特殊……只有在这时，我们的观测才能证实我们的时代非常特殊！"2万亿年以后的宇宙学家只能回到20世纪初的狭隘视野，闭锁在独一无二的星系中，认为星系就是整个宇宙。

最后，平坦宇宙不可避免地进一步变平，跟宇宙开始时同样空无。这时根本不会有宇宙学家观测宇宙。即使有，他们也没有什么可以观测。一无所有。甚至原子也不存在。空无。你可能觉得这种前景阴沉黯淡，一无是处。现实没有义务让我们舒服。玛格丽特·富勒（Margaret Fuller）说："我接受宇宙。"我想，这是心满意足的口气。托马斯·卡莱尔（Thomas Carlye）的口气更沮丧："老天爷，就这样吧。"我个人认为：无限平坦空无的宇宙自有其宏伟壮观，至少值得鼓起勇气面对。

但如果能够有化为无，为何不能无中生有？或者，根据神学术语，为什么有胜于无？我们在这里离开劳伦斯·克劳斯的著作，学到了重要的一课。物理学不仅告诉我们无中如何生有，而且更有甚者。根据劳伦斯·克劳斯的著作，虚空不稳定，注定产生物质。如果克劳斯的理解始终无误，基本原理类似负负得正的物理学版本。粒子和反粒子生生灭灭，像亚原子的流星，一面相互毁灭，一面反过来无中生有。

无中生有的自发起源始于时空开端的奇点。大爆炸之后是暴涨，一切物质几秒钟内膨胀了28个数量级（想想后面增加28个零）。这个概念多么奇特、荒谬！确实，这些科学家呀！他们跟中世纪神学家一样坏，计算针尖上的天使，争论神秘的变体说。

不，不是这样。没有这样猛烈而彻底。科学有许多未解之谜（值得卷起袖子大干）。但有些东西我们不是仅有近似的了解（宇宙有几十亿年寿命，而不是几千年），而是精确了解、确有把握。如前所述，宇宙年龄已经精确到4位数。这种精确性足以给我们留下深刻印象，但还没有劳伦斯·克劳斯及其同事的预测同样的震撼。克

劳斯心目中的英雄理查德·费曼指出：量子理论有些预测（依据的设想如此诡异，又一次超过了最反对启蒙的神学家的梦想）的精确度相当于：测量纽约（New York）和洛杉矶的距离，精确到一根头发的宽度。

神学家可以推测针尖上的天使，或是诸如此类的当代等价物。物理学家自有他们的针尖和天使：量子和夸克，桀数、奇异性和自旋。不过，物理学家能够计算他们的天使、确定最近的100亿天使，一个不多、一个不少。科学可能诡异难解，比神学更甚，但科学起作用，科学有结果。科学能送你上土星，途中绕过金星和木星。我们可能不懂量子理论（天晓得），但一种理论预测现实，精确到10位数后，不可能在任何直接意义上错误。神学不仅缺少数位，而且缺少真实世界的最细微联系。正如托马斯·杰斐逊（Thomas Jefferson）建立弗吉尼亚大学（University of Virginia）时所说：“学校不应该设立神学教席。”

你如果问宗教信徒：他们为什么信教，极少数神学家会说上帝是“万物的基础”、“人际关系的隐喻”或诸如此类的遁词。但大多数信徒更诚实、更脆弱，坚持某种版本的设计论或第一因。大卫·休谟（David Hume）一系的哲学家不费吹灰之力，就能证明他们漏洞百出。他们将生物起源归因于造物主。但达尔文在“贝格尔”号（Beagle）上研究真实世界，发现了更简洁的解释，无须诉诸设计论。在生物学领域，尘埃已经落定。这里本来是自然神学家心爱的狩猎场，直到达尔文把他们赶出去。达尔文不是有意的，他为人最温和、最善良不过。神学家逃到更人迹罕至的物理学和宇宙起源领域，却发现劳伦斯·克劳斯及其先驱者已经严阵以待。

物理定律和常数是不是精心协调的计划，以产生人类为目的？你是不是认为：需要某种启动者？维克多·斯特格（Victor Stenger）的著作会向你指出这种论证的谬误。还有斯蒂文·温伯格、彼得·阿特金斯（Peter Atkins）、马丁·瑞斯、斯蒂芬·霍

金的著作可供参考。而劳伦斯·克劳斯的著作从中脱颖而出。你看看这本书，甚至神学家最后的王牌“为什么有物，而不是空无？”都会在你面前冰消瓦解。如果说《物种起源》（*The Origin of Species*）是生物学领域给无神论者的礼物，那么我们可以将《无中生有的宇宙》（*A Universe from Nothing*）视为物理学领域的礼物。书的标题清晰解释了书的内容。这个说法是具有毁灭性的。

关于作者

劳伦斯 •M. 克劳斯是亚利桑那大学地球和太空探索学校以及物理系的基础教授，也是起源研究项目主任。起源研究项目涉及关注物种起源方方面面的革新而广泛的跨学科研究、教学和外延：从宇宙的起源到人类的诞生，到意识和文化的出现。

克劳斯是国际知名的理论物理学家，拥有广泛的研究兴趣，包括宇宙学与基本粒子物理学的交叉领域。1982 年，他在麻省理工获得博士学位，然后加入了哈佛学社。1985 年，他加入了耶鲁大学物理学项目。1993 年，他前往西部保留地大学，从 1993 年至 2005 年，他在西部保留地大学一直担任物理系的系主任。他的研究和著述获得许多国际奖项，也是唯一一位获得三大美国主要的物理协会（美国物理学会，美国物理教师协会，美国物理研究所）颁发的协会大奖的物理学家。

克劳斯也是一位今日少有的几位积极跨越科学和流行文化之间的鸿沟的著名科学家之一，因此他被《美国科学人》杂志誉为一位独有的“公共知识分子”。

除了他的图书著作、电台和电视作品以及他大量的报纸和杂志评论，他还曾经与克里夫兰管弦乐团合作演出表演，在花蕊音乐中心上座率最高的音乐会上用旁白叙述古斯塔夫 • 霍尔斯特的作品《行星》。

他也曾经因为书写《星际迷航》的原声音乐CD唱片套上的说明文字而受到格莱美音乐大奖的提名。2005年，他还担任过圣丹尼斯电影节的陪审团成员。